

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

**MILLORA DE L'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA EN L'ASSAIG DE CONVERTIDORS
DE FREQUÈNCIA**



Volum I: Memòria

Autor: Bangali Diakhaby Guerrero
Director: Roberto Villafáfila Robles
Co-Director: Antoni Sudrià i Andreu
Convocatòria: Juny 2018



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Resum

En aquest projecte s'estudien les possibles alternatives que permeten millorar l'eficiència energètica en els sistemes de test de variadors de freqüència. L'objectiu principal d'aquest treball és dissenyar i construir un sistema de prova que permeti reduir el consum energètic respecte als sistemes utilitzats en l'actualitat.

Per aconseguir aquest objectiu s'ha estudiat la possibilitat d'utilitzar diversos sistemes de prova que proporcionen resultats diferents per posteriorment realitzar una comparació dels resultats i de la viabilitat de cada sistema. Tenint en compte els aspectes de cada proposta s'ha seleccionat l'alternativa que s'ha considerat més adequada per la seva viabilitat i la millora de l'eficiència energètica que comporta. Un cop escollida la proposta de solució s'ha realitzat un assaig del funcionament del sistema amb el qual s'ha corroborat que el sistema utilitzat compleix els objectius del projecte. Una vegada comprovat el correcte funcionament s'ha procedit al disseny elèctric i mecànic, procurant que el sistema disposi de les mesures de seguretat necessàries per evitar que el personal pugui patir danys i que el seu mode de funcionament sigui el més senzill possible. Finalment s'ha realitzat el muntatge definitiu que permet assajar els variadors de freqüència reduint el seu consum energètic.

Resumen

En este proyecto se estudian las posibles soluciones alternativas que permiten mejorar la eficiencia energética en los sistemas de test de variadores de frecuencia. El objetivo principal de este trabajo es diseñar y construir un sistema de prueba que permita reducir el consumo energético respecto a los sistemas utilizados en la actualidad.

Para conseguir este objetivo se ha estudiado la posibilidad de utilizar diversos sistemas de prueba que proporcionan resultados diferentes para posteriormente realizar una comparación de los resultados y de la viabilidad de cada sistema. Teniendo en cuenta los aspectos de cada propuesta se ha seleccionado la alternativa que se ha considerado más adecuada por su viabilidad y la mejora de la eficiencia energética que comporta. Un vez escogida la propuesta de solución se ha realizado un ensayo del funcionamiento del sistema con el que se ha corroborado que el sistema utilizado cumple con los objetivos del proyecto. Después de verificar el correcto funcionamiento se ha procedido al diseño eléctrico y mecánico, procurando que el sistema disponga de las medidas de seguridad necesarias para evitar que el personal pueda sufrir daños y que su modo de funcionamiento sea lo más sencillo posible. Finalmente se ha realizado el montaje definitivo que ha permitido ensayar variadores de frecuencia reduciendo su consumo energético.

Abstract

In this project, are studied the possibles alternatives that allow to improve the energetic efficiency in the test systems of variable frequency drives. The main objective of this work is, to design and to build a test system that allows to reduce the energy consumption compared to the systems currently used.

To obtain this objective has been studied the possibility to use different test systems that provide divers results for subsequently make a comparative of the results and the viability of each system. Bearing in mind the aspects of each designs, it has been selected the alternative that has been considerate more suitable for his viability and the improvement of the energetic efficiency that it imply. Once the solution proposal has been chosen, a performance test has been carried out in which it has been corroborated that the system achieves the project objectives. When the correct work of the system has been verified, it has been done an electric and mechanic design making sure that the system have the necessary security measures to prevent staff from being harmed and that its mode of operation are easy to use. Finally, the final assembly has been done that allows to test variable frequency dives reducing its energetic consumption.

Agraïments

En primer lloc vull agrair l'ajuda que m'ha proporcionat el co-director d'aquest projecte, l'Antoni Sudrià i Andreu, per tots els coneixements que m'ha transmès i per la col·laboració en la solució dels problemes que han sorgit. També agrair l'ajuda rebuda per la resta de companys de l'empresa teknoUstex, especialment a l'Àlvar Parés Vives per la seva implicació en aquest projecte.



Índex

Resum	v
Resumen	vi
Abstract	vii
Agraïments	ix
1. Introducció	14
1.1.Objectius del treball	14
1.2.Abast del treball	15
2. Variadors de freqüència	16
2.1.Definició	16
2.2.Funcionament	16
2.2.1. Etapla de potència	16
2.2.2. Etapla de control	22
2.3.Variadors de freqüència a teknoUstex	23
3. Propostes de solució	25
3.1.Introducció	25
3.2.Alternatives	25
3.2.1. Proposta 1: Dissipació d'energia mitjançant un grup resistiu	25
3.2.2. Proposta 2: Reutilització energètica mitjançant el Bus DC	26
3.2.3. Proposta 3: Reinjecció de l'energia a la xarxa	28
3.3.Estudi i selecció de les propostes	29
4. Proposta realitzada	31
4.1.Introducció	31

4.2. Justificació del funcionament de l'alternativa seleccionada	33
4.2.1. Motor d'inducció	33
4.2.1.1. Introducció i estructura	33
4.2.1.2. Funcionament	34
4.2.1.3. Circuit equivalent	35
4.2.1.4. Balanç de potències	37
4.2.1.5. Modes de funcionament	38
4.2.2. Justificació del funcionament del projecte	40
4.2.3. Proves inicials del funcionament del sistema	46
4.2.3.1. Elements del muntatge de prova	46
4.2.3.2. Obtenció de dades	47
4.2.3.3. Funcionament del muntatge de prova	48
4.2.3.4. Resultats obtinguts	49
4.2.3.5. Conclusions de la prova	53
4.3. Elements externs	56
4.3.1. Bancada de motors	56
4.3.2. Inverter incorporat al sistema	58
4.3.2.1. Inverter Omron	59
4.4. Disseny del muntatge	66
4.4.1. Disseny Elèctric	66
4.4.1.1. Interruptors i proteccions	66
4.4.1.2. Equips de mesura	82
4.4.1.3. Filtre	89
4.4.1.4. Altres elements utilitzats	97

4.4.2.	Disseny mecànic	99
4.4.2.1.	Armari utilitzat	99
4.4.2.2.	Tapa superior del armari	102
5.	Impacte ambiental	112
5.1.	Introducció	112
5.2.	Impacte del sistema realitzat	114
5.2.1.	Impacte dels components utilitzats	114
6.	Pressupost	116
6.1.	Cost de fabricació per l'empresa	116
6.2.	Cost de fabricació de l'equip per comercialitzar	122
7.	Conclusions	124
7.1.	Conclusions del treball	124
7.2.	Futurs treballs	125
8.	Bibliografia	127

Annexos

1. Manual d'usuari
2. Plànols i esquemes elèctrics

1. Introducció

En les últimes dècades l'impacte ambiental produït per la influència de l'ésser humà està afectant el canvi climàtic, provocant un escalfament global de la temperatura de la terra. Com a conseqüència s'està provocant variacions en els ecosistemes que són perjudicial per a la vida dels éssers vius. Aquest escalfament de la temperatura es deu a l'alt nivell d'emissions de gasos amb efecte hivernacle que s'està generant en els últims anys. L'increment de les emissions d'aquests gasos va directament relacionat amb l'augment del consum energètic, ja que una gran part d'aquestes emissions es produeix en la generació i el consum d'energia. De forma que considerant que el consum energètic està en constant creixement, el problema provocat per les emissions augmentarà en els pròxims anys. Una de les possibles solucions per evitar el constant creixement del consum energètic és millorar l'eficiència energètica.

En les últimes quatre dècades el tipus d'energia que ha patit un increment més elevat és l'energia elèctrica que gairebé ha duplicat el seu consum. Aquest consum es realitza a gairebé tots els àmbits però les indústries són els consumidors majoritaris, amb un 42% del consum global. Tenint en compte que el 76% de l'energia elèctrica és generada per fonts d'energia no renovables, reduir el consum d'energia elèctrica és un factor clau per reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Segons un estudi realitzat per l'empresa ABB els motors elèctrics consumeixen 2/3 parts de l'energia elèctrica consumida per la indústria, que correspon a un 28% del consum global d'aquesta energia.

Durant l'estada de pràctiques acadèmiques a l'empresa teknoUstex, l'estudiant ha comprovat que els sistemes de verificació dels variadors de freqüència que s'utilitzen comporten un alt consum energètic. Per aquest motiu s'ha decidit realitzar un projecte en el qual s'estudia la possibilitat de millorar l'eficiència energètica dels sistemes de prova d'aquests equips.

1.1. Objectius del treball

L'objectiu principal d'aquest treball és dissenyar i realitzar el muntatge d'un sistema de prova per a variadors de freqüència que redueixi el consum energètic dels sistemes de prova actuals. Considerant les característiques necessàries a l'empresa es pretén que aquest projecte serveixi per realitzar un sistema de prova efectiu per a la gran majoria dels variadors de freqüència s'utilitzen a l'empresa.

1.2. Abast del treball

En aquest projecte s'ha estudiat els diferents muntatges que pot realitzar l'empresa teknoUstex per millorar l'eficiència energètica dels sistemes d'assaig de variadors de freqüència i s'ha seleccionat un per realitzar el disseny i muntatge. Prèviament al muntatge s'ha realitzat unes proves que certifiquen que el sistema de prova seleccionat redueix significativament el consum energètic.

Una vegada comprovat que el sistema compleix els objectius principals s'ha realitzat el disseny elèctric i mecànic de manera que la utilització d'aquest sistema de prova es realitzi de forma segura i còmode.

Finalment s'ha realitzat el muntatge definitiu i s'ha comprovat que compleix amb els objectius principals i per tant que millora l'eficiència energètica del sistema d'assaig.

2. Variadors de freqüència

2.1 Definició

Un variador de freqüència també anomenat *inverter* en anglès, és un equip electrònic que s'utilitza per variar la velocitat de rotació d'un motor de corrent altern variant la freqüència i el voltatge que rep el motor.

El funcionament d'aquests equips es basa en el fet que la variació de la freqüència d'alimentació de l'estator modifica la velocitat de sincronisme del camp magnètic giratori que produeix un gir en el rotor. [1][2]

2.2 Funcionament

El funcionament d'aquests equips se separa en una etapa de potència i una de control.

2.2.1 Etapa de potència

L'etapa de potència d'un variador de freqüència està formada per tres blocs funcionals: un convertidor CA/CC, un bus de corrent continu i un convertidor CC/CA. A la figura 2.1 es mostra un esquema blocs del variador.

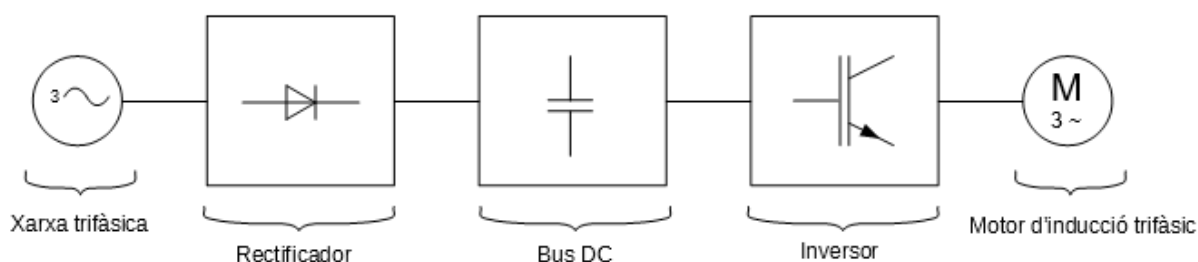


Figura 2.1 Esquema blocs d'un variador de freqüència

- Convertidor CA/CC:

La majoria de l'*inverters* utilitzen un rectificador d'ona completa per convertir el senyal trifàsic de la xarxa en una ona de corrent continu. El rectificador utilitzat és de tipus no controlat i està format per un pont de díodes, de manera que la conversió es realitza automàticament sense necessitat de cap control. A la figura 2.2 es mostra l'esquema d'un rectificador d'ona completa no controlat.

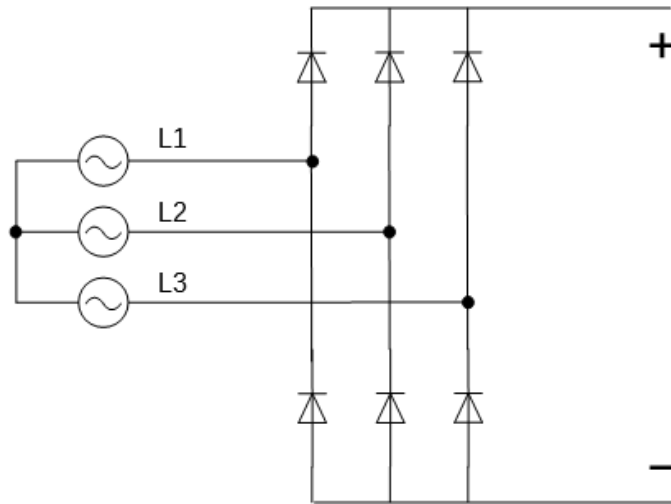


Figura 2.2 Rectificador trifàsic de pont complet

L'ona que s'obté a la sortida del rectificador és una ona de corrent continu rectificada, per tant és una ona que té un cert rissat. El valor de pic d'aquesta ona ve donat per la fórmula següent:

$$V_{pic} = \sqrt{2} V_{LL} \quad (2.1)$$

On V_{pic} és el valor màxim que té la ona i V_{LL} és la tensió entre dues de les línies trifàsiques. En el cas del taller de teknoUstex la tensió V_{LL} és de 400 V, per tant $V_{pic} = 565$ V. La figura 2.3 representa l'ona trifàsica i l'ona obtinguda a la sortida del rectificador.

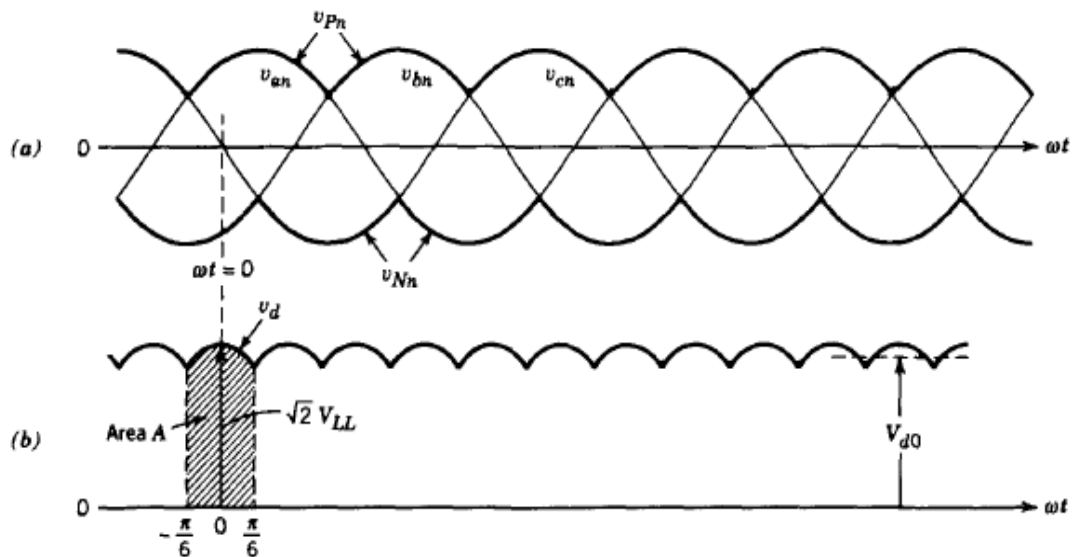


Figura 2.3 (a) Ona trifàsica (b) Ona rectificada per un pont de díodes

Font: Power Electronics Converters, Applications and Desing, Ned Morgan, Tore M. Undeland, William P. Robbins

Calculant l'integral de la zona marcada a la figura 2.3 entre $-\pi/6$ i $\pi/6$, s'obté que el valor eficaç de l'ona ve definit per la següent formula: [3]

$$V_{rms} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} = 1,35 V_{LL} \quad (2.2)$$

On V_{rms} és el valor eficaç de l'ona rectificada. Utilitzant el mateix valor de la tensió de línia que en el càlcul anterior s'obté que el valor eficaç de l'ona és de 540 V aproximadament.

Bus DC:

El bus de corrent continu, o Bus DC, d'un *inverter* està format per un grup de condensadors electrolítics que permeten estabilitzar la tensió continua provinent del rectificador. Depenent de la potència del circuit aquests condensadors poden ser de capacitats diferents però sempre compleixen la mateixa funció.

Quan es connecta un condensador electrolític totalment descarregat a una font d'alimentació es genera un pic de corrent elevat. Per evitar que aquest pic pugui perjudicar els elements connectats al Bus DC la majoria dels *inverters* disposen d'un circuit de precàrrega dels condensadors. Aquest circuit consisteix en connectar una resistència entre el rectificador i el bus de condensadors durant els primers instants, de manera que quan els condensadors estan descarregats el corrent que circula pel bus queda limitat al corrent que circula per la resistència. Una vegada els condensadors ja estan suficientment carregats es curtcircuita la resistència amb els contactes d'un contactor.

Convertidor CC/CA:

Els *inverters* utilitzen un convertidor CC/CA que els permet convertir la tensió continua del Bus DC en una ona trifàsica que alimenta els motors. En aquests equips el convertidor utilitzat és de tipus ondulator i està format per un grup d'interruptors controlats, dos a cada fase. Commutant la connexió i desconnexió d'aquests interruptors s'aconsegueix una ona trifàsica.

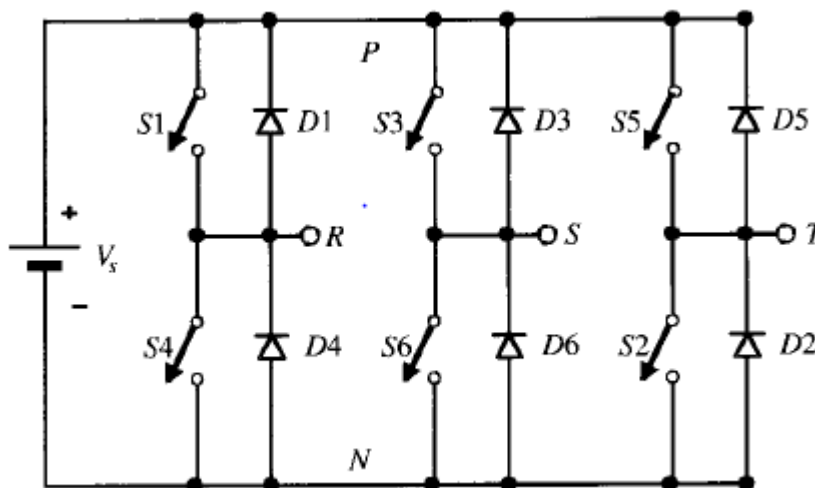


Figura 2.3 Esquema bàsic del funcionament d'un inverter trifàsic.

Font: Màquina Eléctricas, Jesus Fraile Mora

El funcionament dels inversors es basa en el fet que els terminals R, S i T es connecten alternativament al terminal positiu i negatiu del Bus DC, donant lloc a una ona trifàsica, sempre i quan els polsos que tanquen els interruptors estiguin desfasats 120° entre si.

Per obtenir un inversor controlat se substitueixen els interruptors de l'esquema anterior per interruptors controlats, en el cas dels *inverters* s'utilitzen transistors bipolars de porta aïllada també coneguts per les sigles IGBT, provinents de la seva nomenclatura en anglès (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). La nomenclatura dels interruptors a la imatge està realitzada de manera que representa el cicle de tancament dels interruptors que permeten obtenir una ona trifàsica. [4]

L'ona obtinguda no és del tot sinusoidal, ja que les tensions van directament entre els valors positius i negatius del bus de contínua. A la imatge següent es representen les formes d'ona de les tensions que s'obtenen mesurant entre els terminals R, S, T i el neutre. També es pot observar que l'ona resultant de la conversió no és sinusoidal sinó que està composta per diversos trams d'ones quadrades. Tot i això la forma d'ona de la component fonamental sí és sinusoidal com es pot observar a la figura 2.4.

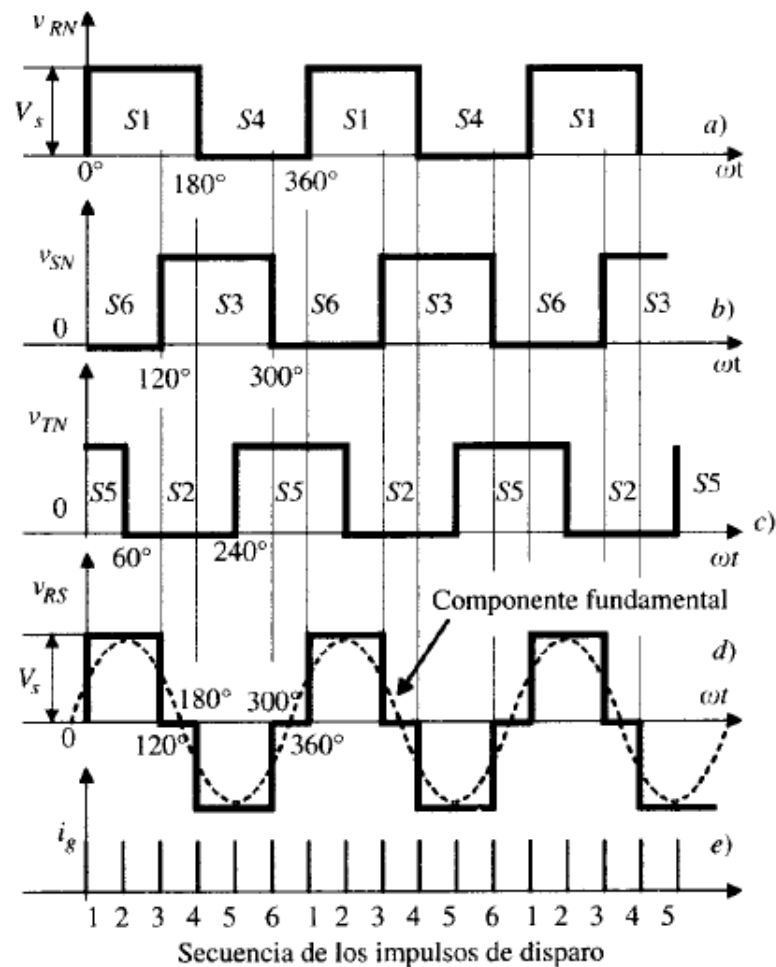


Figura 2.4 Representació de la ona obtinguda del inversor

Font: Màquina Eléctricas, Jesus Fraile Mora

La forma més utilitzada per la variació de la velocitat de gir d'un motor és la variació de la freqüència d'alimentació, ja que aquesta modifica la velocitat de sincronisme del camp magnètic rotatori. Però no és suficient amb variar la freqüència, ja que el flux magnètic entre l'estator i el rotor és inversament proporcional a la freqüència d'alimentació de forma que en disminuir aquesta freqüència el flux magnètic tendeix a saturar provocant un excessiu corrent a l'estator. Per estabilitzar el motor s'ha de variar la tensió d'alimentació proporcionalment a la variació de la freqüència, per tant quan es varia la velocitat d'un motor s'ha de mantenir la relació tensió- freqüència constant. Aquesta relació no es compleix a freqüències baixes, ja que la caiguda de tensió a la inductància disminueix amb la freqüència i per tant la component resistiva seria predominant sobre la inductiva. Per tant la recta que forma la relació tensió-freqüència quedarà desplaçada verticalment com es mostra a la figura 2.5. [3][5]

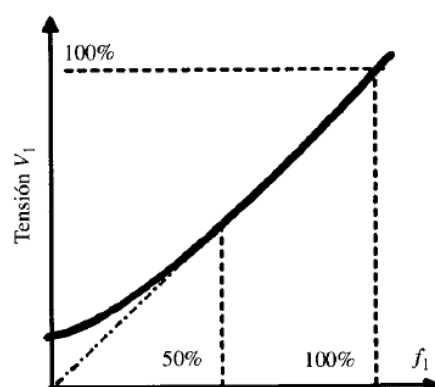


Figura 2.5: Corba tensió-freqüència d'un motor d'inducció

Font: Máquinas eléctricas, Jesus Fraile Mora

Per aconseguir variar la freqüència i la tensió de l'alimentació s'actua sobre el control dels interruptors, de manera que s'aconsegueix canviar l'amplada dels polsos rectangulars de l'ona de sortida. Aquesta tècnica s'anomena PWM (de les sigles en anglès de *Pulse width-modulation*).

Aquest mètode consisteix a dividir l'ona en molts polsos quadrats l'amplada dels quals es varia de forma sinusoidal, de manera que els polsos més propers al pic de l'ona sinusoidal són més amples i els més propers al pas per zero de l'ona són més prims. Aquest estil de modulació genera molt pocs harmònics.

Aquesta modulació s'aconsegueix utilitzant una ona moduladora i una portada. La moduladora ha de tenir una forma sinusoidal i una freqüència igual a la que es vol obtenir a la sortida. L'ona portadora és una triangular amb amplitud igual i freqüència superior a la de l'ona moduladora. Aquestes dues ones es superposen, de manera que els punts d'intersecció

significaran un canvi a la tensió de sortida. A la imatge (a) de la figura 2.6 es representa l'ona moduladora V_P i portadora V_T . Si s'utilitza el mètode explicat anteriorment com a resultat s'obté l'ona de la imatge (b) de la figura 2.6.

Variant la freqüència de l'ona moduladora s'aconsegueix variar la freqüència d'alimentació dels motors i variant l'amplitud de l'ona moduladora variarà el valor eficaç de la tensió de sortida.

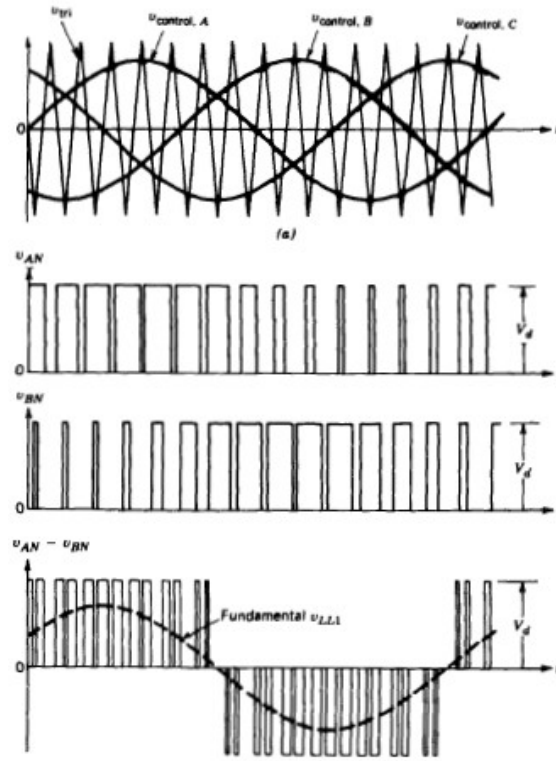


Figura 2.6 (a) Ona moduladora i Ona portadora (b) Ona resultant PWM
Font: Power Electronics Converters, Applications and Design, N. Mohan

Quan s'alimenta un motor amb una tensió PWM la inductància del motor actua com a filtre i l'ona de corrent ja és molt semblant a una sinusoidal, però amb un cert rissat degut al temps de càrrega i descàrrega dels condensadors que formen el bus.

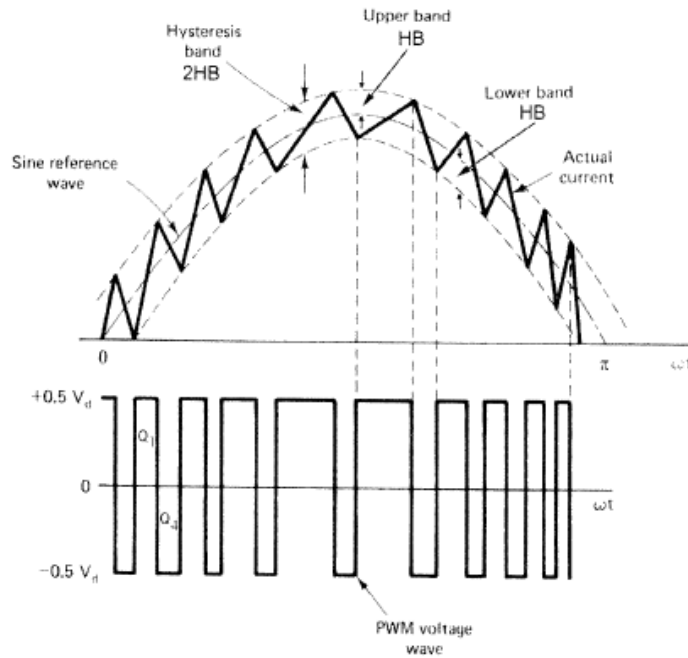


Figura 2.7 Corrent obtingut amb la modulació PWM

Font: Moder Power Electronics and AC Drivers, Bilman K. Bose

2.2.2 Etapa de control

L'etapa de control d'un *inverter* s'encarrega principalment de controlar el funcionament dels elements de l'etapa de potència. La seva funció principal és controlar l'activació dels IGBT de forma que s'aconsegueix la modulació PWM adequada i per tant es varia la velocitat de gir del motor. Atès que el senyal generat pel microcontrolador de control té un corrent insuficient per activar i desactivar els IGBTs, s'utilitzen un *drivers* que generen els corrents necessaris pel control d'aquests equips.

Una altra funció important de l'etapa de control és controlar la precàrrega del Bus DC, de manera que quan els condensadors estan suficientment carregats es curtcircuita, mitjançant un pont, la resistència de precàrrega.

Per aconseguir aquest control s'utilitzen microcontroladors o DSP que permeten variar la seva programació en funció de les necessitats. Existeixen diversos modes de programació en funció del model i del fabricant, ja que en alguns casos es realitza mitjançant una botonera col·locada a l'exterior de l'equip i en alguns casos es realitza a través de la comunicació amb un ordinador.

L'alimentació de l'etapa de control acostuma a ser de corrent continu, de manera que aquests equips necessiten unes fonts d'alimentació que converteixen el corrent altern de la xarxa a un corrent continu que permet alimentar el sistema de control.

2.3 Variadors de freqüència a teknoUstex

L'empresa teknoUstex és una empresa que treballa des de fa anys com a servei de reparació d'equips electrònics provinents de la indústria tèxtil. En aquesta empresa es reparen tot tipus d'equips que es poden trobar en aquesta indústria, però la majoria dels equips amb els quals es treballa són variadors de freqüència. Com s'ha explicat a la introducció els motors d'inducció són molt presents a les indústries, per controlar la velocitat d'aquests motors en la majoria de casos s'utilitzen variadors de freqüència. A la indústria tèxtil aquests equips són molt utilitzats per controlar la velocitat dels motors que s'utilitzen en els diferents processos de la fabricació tèxtil.

A teknoUstex es raparen *inverters* fabricats per diverses marques i característiques que poden variar, com per exemple la potència màxima. Fins l'actualitat s'ha reparat equips amb potències d'entre 0,5 kW i 40 kW, de manera que no es poden utilitzar els mateixos sistemes d'assaig.

Per verificar que aquests equips s'han reparat correctament se segueixen una sèrie de procediments que poden ser diferents depenent del model i les característiques de l'equip. Una vegada es considera que l'equip està en condicions per funcionar es realitzen unes proves que verifiquen el correcte funcionament de l'equip. La primera prova que es realitza és l'alimentació amb la xarxa trifàsica per assegurar-se que el rectificador funciona correctament, per això es mesura la tensió al Bus DC i es comprova que és l'adequada. Per verificar el funcionament del bloc inversor es connecten unes bombetes de 200 W a la sortida d'alimentació del motor i es comprova que s'encenen amb la freqüència adequada. Una vegada s'ha assegurat que les sortides donen una tensió estable i equilibrada es procedeix a la prova definitiva que és la connexió del motor. Fins ara a l'empresa es connectava un motor d'inducció de 3 kW acoblat a un motor de corrent continu que s'utilitzava com a càrrega alimentant unes resistències on es dissipava tota l'energia en forma de calor. Aquest sistema de prova només permetia testejar equips a la potència màxima que permet el motor d'inducció, 3 kW, de manera que els equips amb potència màxima superior no es poden provar a la potència nominal.

Per aquest motiu s'ha realitzat aquest projecte, que permet comprovar el funcionament dels *inverters* a potències més elevades i aprofitant l'energia que fins ara es dissipava.

3. Propostes de solució

3.1 Introducció

En aquest projecte, com s'ha explicat amb anterioritat, s'ha realitzat un estudi de com millorar l'eficiència energètica en assajos de variadors de freqüència per motors d'inducció. L'estudi de les possibles solucions que es poden realitzar per complir aquest objectiu ha conclòs en tres muntatges que s'analitzaran en aquest apartat. De les tres propostes s'ha escollit la que s'ha considerat més adient i s'ha realitzat un estudi amb més profunditat per acabar realitzant el disseny d'aquest muntatge.

L'objectiu principal del sistema de prova d'un *inverter* és comprovar que l'equip funciona correctament en el seu hàbit natural de treball, de manera que en tots els sistemes de prova l'*inverter* es connectarà un motor d'inducció que es farà girar a diferents velocitats.

3.2 Alternatives

3.2.1 Proposta 1: Dissipació d'energia mitjançant un grup resistiu

Aquesta proposta es basa en el sistema d'assaig d'inverters que es disposa a l'empresa teknoUstex, aquest muntatge es va realitzar gràcies a la seva simplicitat de muntatge i facilitat d'ús.

El muntatge consisteix en connectar l'*inverter* de prova a un motor d'inducció acoblat mecànicament a un motor de corrent continu que funciona com a càrrega alimentant unes resistències. A la figura 3.1 es representa mitjançant blocs funcionals la connexió del sistema d'aquesta proposta.

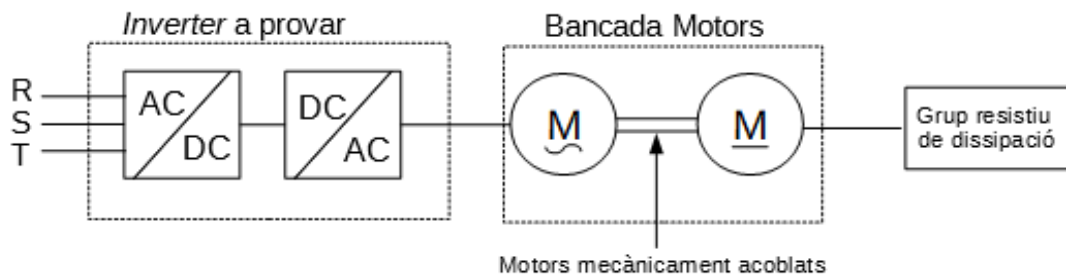


Figura 3.1 Diagrama blocs sistema de frenat per dissipació en grup resistiu

El funcionament principal d'aquest muntatge consisteix en alimentar el motor d'inducció mitjançant l'*inverter* de prova. A l'utilitzar una bancada de dos motors acoblats mecànicament el motor d'inducció fa girar el motor de corrent continu. Aquesta rotació de l'eix del motor de corrent continu provoca que aquest motor treballi en règim de generador

elèctric i per tant genera energia als seus terminals que es dissipa en forma de calor mitjançant un grup resistiu. Per variar la càrrega del motor d'inducció es modifica excitació del motor de corrent continu, de forma que augmenta el parell resistiu del motor d'inducció i per tant augmenta la seva potència consumida.

El muntatge realitzat a l'empresa està format per un motor d'inducció de 3 kW i per un grup resistiu amb càrrega variable.

3.2.2. Proposta 2: Reutilització energètica mitjançant el Bus DC

Aquesta proposta sorgeix de la necessitat de provar els *inverters* a potències més elevades que les que permet la proposta anterior. Atès que la potència màxima a la qual es pot testejar l'*inverter* està limitada per la potència màxima del motor i la potència contractada en el taller, s'ha estudiat la possibilitat de realitzar un muntatge que permet provar equips a potències més elevades consumint la mínima energia provinent de la xarxa i per tant millorant l'eficiència energètica.

En aquest cas s'ha estudiat la utilització de dos *inverters* que alimenten dos motors d'inducció acoblats mecànicament, un dels quals és l'*inverter* que es vol provar. A la figura 3.2 es representa mitjançant blocs funcionals el funcionament del sistema. [6] [7]

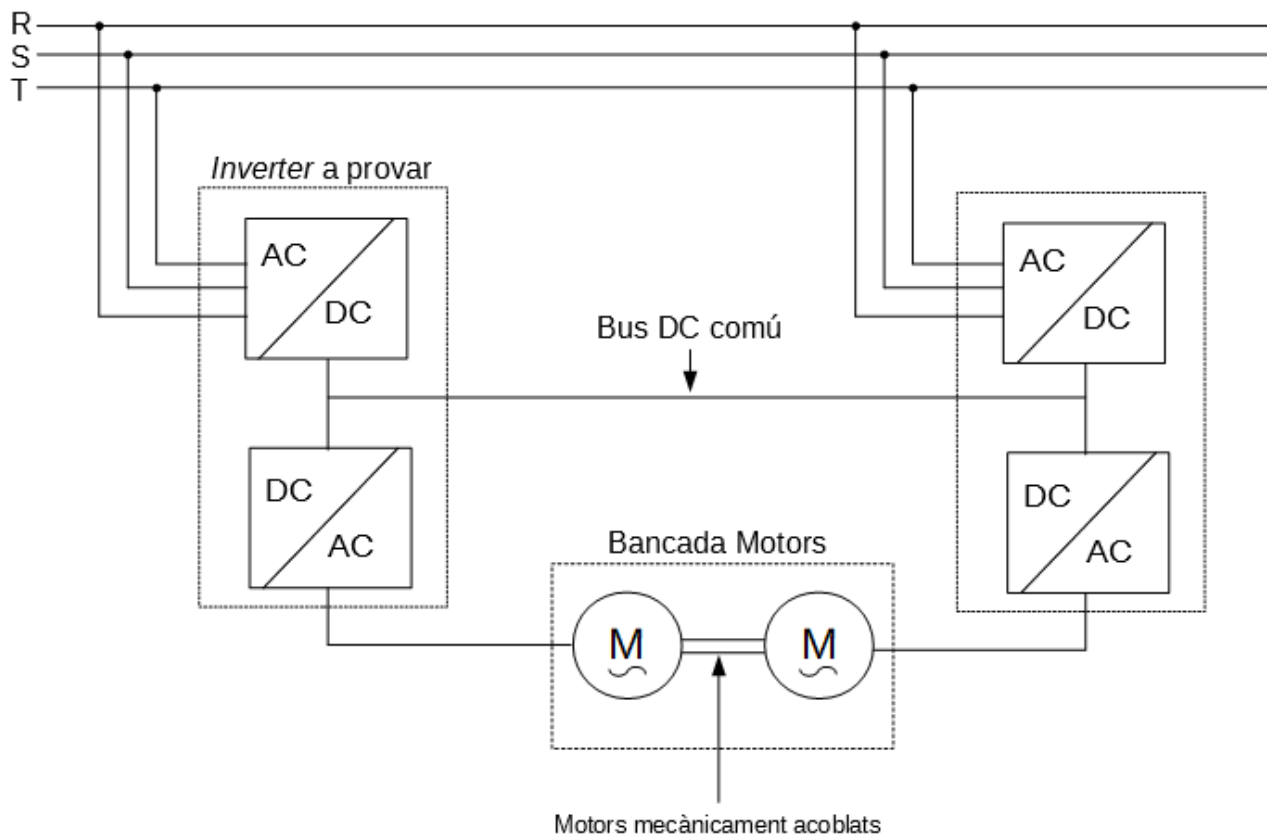


Figura 3.2 Diagrama blocs sistema de frenat per busos comuns

El funcionament del muntatge es basa en els modes de treball principals d'un motor d'inducció, el funcionament en règim de motor i el funcionament en règim de generador.

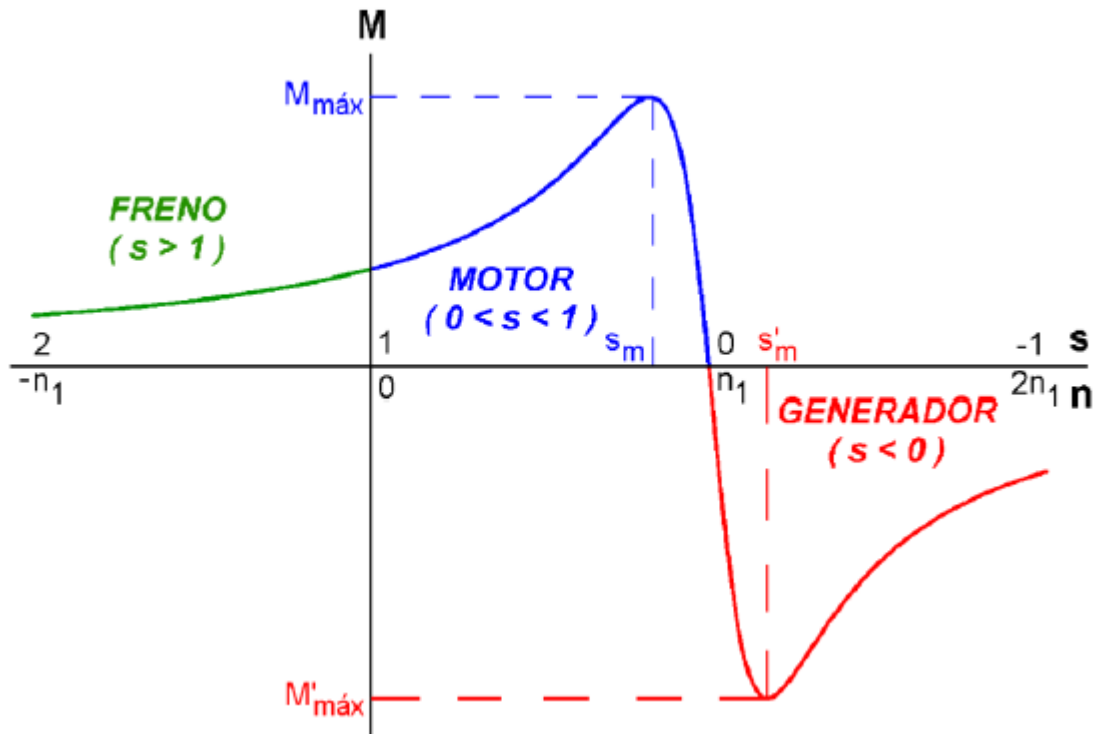


Figura 3.3 Corba parell-velocitat motor d'inducció

Font: Frenado de máquinas asincronas o de inducción, Miguel Angel Rodriguez [8]

La idea principal de funcionament d'aquest muntatge es basa en el funcionament dels motors mostrat a la figura 3.3, on a l'eix de les abscisses es representa la velocitat de gir del motor, sent n_1 la velocitat assignada o velocitat de sincronisme, i l'eix de les ordenades representa el parell realitzat pel motor. Com s'observa quan la velocitat de gir del motor és inferior a la velocitat de sincronisme el motor treballa en règim de motor i per tant el seu parell és positiu. En canvi quan la seva velocitat de gir és superior a la velocitat de sincronisme el motor treballa en règim de generador i per tant el seu parell és negatiu. En el règim motor de funcionament el motor consumeix energia provinent de l'equip que l'alimenta, en aquest cas l'inverter, d'altra banda, quan el motor funciona en règim de generador envia energia a l'inverter que l'alimenta.

Per aconseguir que cada motor treballi en un mode de funcionament s'assignen diferents velocitats de sincronisme a cada motor, de manera que a l'estar acoblats mecànicament la velocitat de gir dels seus eixos es trobarà en un punt mitjà entre les dues velocitats de sincronisme.

L'energia que transmet el motor a l'*inverter* es converteix en un increment de la tensió en el bus de corrent continu. Per aprofitar aquesta energia es connecten els Busos DC dels dos *inverters* de manera que l'equip connectat al motor consumeix energia provinent de l'equip connectat al motor generador. Amb aquest sistema s'aconsegueix disminuir l'energia consumida provinent de la xarxa i per tant s'aconsegueix millorar l'eficiència energètica del sistema.

3.2.3 Proposta 3: Reinjecció de l'energia a la xarxa

Aquesta proposta es basa en la idea de millorar l'eficiència del muntatge aprofitant una part de l'energia consumida per reincorporar-la a la xarxa. Per aquest muntatge, igual que en la proposta anterior es necessiten dos *inverters* i dos motors d'inducció acoblats mecànicament. A la figura 3.4 es representa mitjançant diagrama de blocs el principi de funcionament d'aquesta proposta.

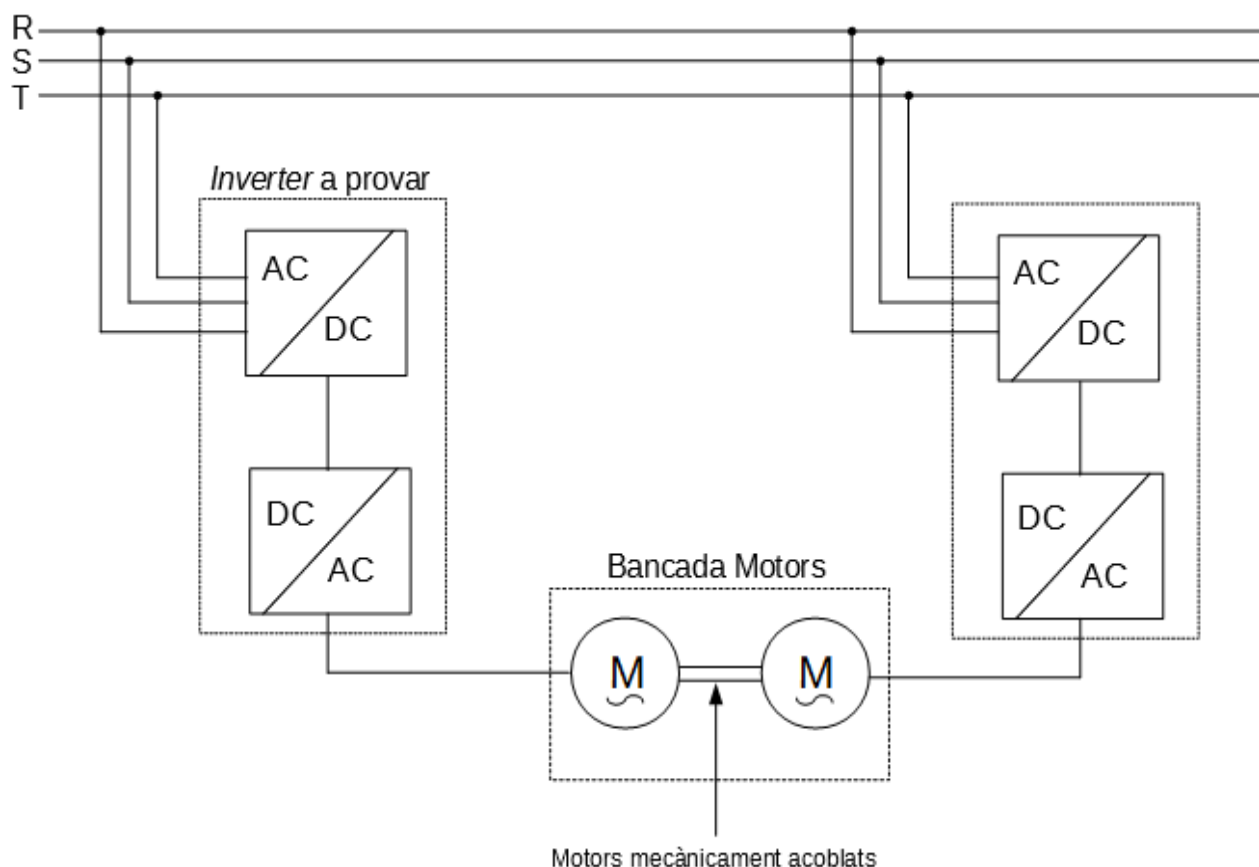


Figura 3.4 Diagrama blocs sistema de frenat per reinjecció a la xarxa

El funcionament d'aquesta proposta es basa en el mateix mètode de funcionament que s'ha explicat a la proposta anterior, en el que es fa treballar en règims de treball diferents els motors que formen la bancada. De manera que el motor connectat a l'*inverter* de prova

treballa en règim de motor i per tant consumeix energia. En canvi el motor connectat a l'altre *inverter* treballa en règim de generador i en conseqüència envia energia a l'equip. De la mateixa forma que s'ha explicat anteriorment, l'energia generada pel motor produeix un augment de la tensió en el bus de corrent continu de l'*inverter*. En aquesta proposta, amb l'objectiu de millorar l'eficiència del sistema s'aprofita l'energia generada pel motor per introduir-la de nou a la xarxa elèctrica. Com s'ha explicat en la proposta anterior l'energia enviada pel motor produeix un augment de la tensió en el Bus DC de l'*inverter*, en aquest cas per aprofitar l'energia generada es realitza una nova conversió elèctrica que permet obtenir una ona trifàsica que es reintrodueix a la xarxa.

3.3 Estudi i selecció de les propostes

El sistema de frenat mitjançant grup resistiu té l'avantatge que el muntatge és fàcil de realitzar, ja que no es necessiten dos variadors de freqüència i els components que es necessiten són considerablement econòmics. L'inconvenient principal, i el motiu pel qual s'ha descartat la realització d'aquest muntatge, és que l'energia consumida de la xarxa es dissipa en la seva totalitat i per tant no és un muntatge eficient energèticament. Un altre aspecte que s'ha considerat important per desestimar aquesta proposta és el fet que al no reutilitzar l'energia, la potència màxima a la que es pot fer treball els variadors de freqüència és la potència que es té contractada. Per tant amb aquesta proposta només podríem testear a plena potència els variadors de freqüència amb potències inferiors a la potència contractada, i això és un problema perquè com hem mencionat anteriorment els *inverters* que s'utilitzen a l'empresa teknoUstex poden arribar a potències de fins a 40 kW.

La proposta basada en la reinjecció de l'energia a la xarxa sí que compleix el requisit indispensable de reduir el consum energètic de la xarxa, però en aquest cas aquesta proposta s'ha desestimat per les pèrdues que pot tindre, ja que sumant les pèrdues que tenen els motors més les pèrdues que es produïrien al realitzar dues conversions de potència el sistema obtindria un rendiment molt baix. També s'ha tingut en compte la complexitat de dissenyar el control d'un inversor bidireccional que permeti retornar l'energia a la xarxa.

S'ha considerat que el sistema de connexió dels busos de contínua és el més indicada per portar a terme un estudi amb profunditat i realitzar el muntatge. Aquesta idea ens permet obtenir un sistema amb una eficiència energètica elevada, ja que al només realitzar una conversió de potència les pèrdues serien menors que en el cas de la proposta 3. Aquest muntatge també permetrà provar *inverters* a potències elevades sense tindre un consum elevat provinent de la xarxa gràcies a la reutilització energètica.

4. Proposta realitzada

4.1 Introducció

Com s'ha explicat en l'apartat 3.3, la proposta que consisteix en unir els seus busos de corrent continu dels dos *inverters* utilitzats s'ha considerat la més adequada i per aquest motiu és la proposta de la qual s'ha decidit realitzar el disseny i muntatge.

La idea principal d'aquest muntatge és poder comprovar el correcte funcionament dels variadors de freqüència que es reparen a l'empresa teknoUstex. Aquesta comprovació se situa al final del procés que se segueix per reparar aquests equips, quan ja s'ha comprovat que l'equip funciona correctament a potències baixes. En aquesta empresa es reparen equips amb potències que poden arribar fins als 40 kW i per això és necessari disposar d'un sistema de prova que sigui capaç de fer treballar aquests equips a potències semblants a la potència nominal.

Per a la construcció d'aquest projecte s'ha utilitzat material del qual es disposava a l'empresa teknoUstex i s'ha comprat el material necessari. En el cas de la bancada de motors s'ha utilitzat una que es disposava a l'empresa i això limita la capacitat de potència d'aquest sistema, ja que els motors utilitzats són de potència màxima 7,5 kW. Per això és necessari concretar que el muntatge que s'ha realitzat en aquest projecte és la proposta per al muntatge del sistema, un cop demostrat que aquesta proposta funciona correctament i és útil pels propòsits escollits es pot utilitzar com a prototip per desenvolupar sistemes de potència més elevada.

L'objectiu principal és poder posar a prova el variador de freqüència que es vol testejar a la potència més elevada que permet i aconseguir-ho consumint la mínima potència de la xarxa. Per aconseguir aquest objectiu es realitza l'estudi i el disseny de la proposta que posteriorment s'utilitzarà com a mètode de verificació dels variadors de freqüència.

El disseny del muntatge consisteix en utilitzar el frenat dels motors d'inducció. En aquest projecte s'utilitzen 2 motors d'inducció iguals acoblats mecànicament i dos variadors de freqüència.

El funcionament d'aquest muntatge es basa a assignar una velocitat determinada al motor accionat per l'*inverter* que es vol testejar i una velocitat lleugerament inferior al motor accionat per l'altre *inverter*. D'aquesta manera en estar els dos motors acoblats mecànicament els seus eixos giraran a una velocitat intermèdia entre l'assignada per un *inverter* i l'assignada per l'altre. L'equip que s'està testejant intenta fer girar el motor a la velocitat assignada i això

es tradueix en un augment del corrent consumit. Per altra banda, el motor que està girant a una velocitat superior a l'assignada està funcionant com a generador i per tant està enviant energia al seu *inverter*. Aquesta energia produeix un increment en la tensió del Bus DC de l'equip. Per aprofitar l'energia generada pel motor es connecten els busos dels dos equips de forma que es produeix una transferència d'energia d'un equip a l'altre.

Amb aquest sistema de connexió s'aconsegueix que una part de l'energia que consumeix l'*inverter* de prova provingui de l'altre *inverter* i en conseqüència es redueixi el consum energètic provinent de la xarxa.

4.2 Justificació del funcionament de l'alternativa seleccionada

La idea principal d'aquest projecte es basa en el funcionament dels motors d'inducció, més concretament en el funcionament com a motor i com a generador. En aquest apartat s'explicarà com funcionen els motors d'inducció i es justificarà la utilització en aquest projecte.

4.2.1 Motor d'inducció

4.2.1.1 Introducció i estructura

Un motor d'inducció o motor asíncron, és una màquina de conversió electromagnètica de l'energia de tipus rotatiu, que està format per un estator i un rotor. A l'estator d'aquest tipus de motors és on es col·loca l'inductor que és alimentat per una xarxa monofàsica o trifàsica. El corrent que circula per l'estator crea un flux magnètic que indueix un corrent al rotor que el fa girar.

L'estator està format per un bobinat trifàsic distribuït al voltant d'un anell cilíndric d'acer elèctric. Les tres fases d'aquest bobinat estan desplaçades 120° en l'espai l'una respecte l'altre, de manera que al ser alimentades per un corrent trifàsic s'obté un camp magnètic giratori d'amplitud constant. [5]

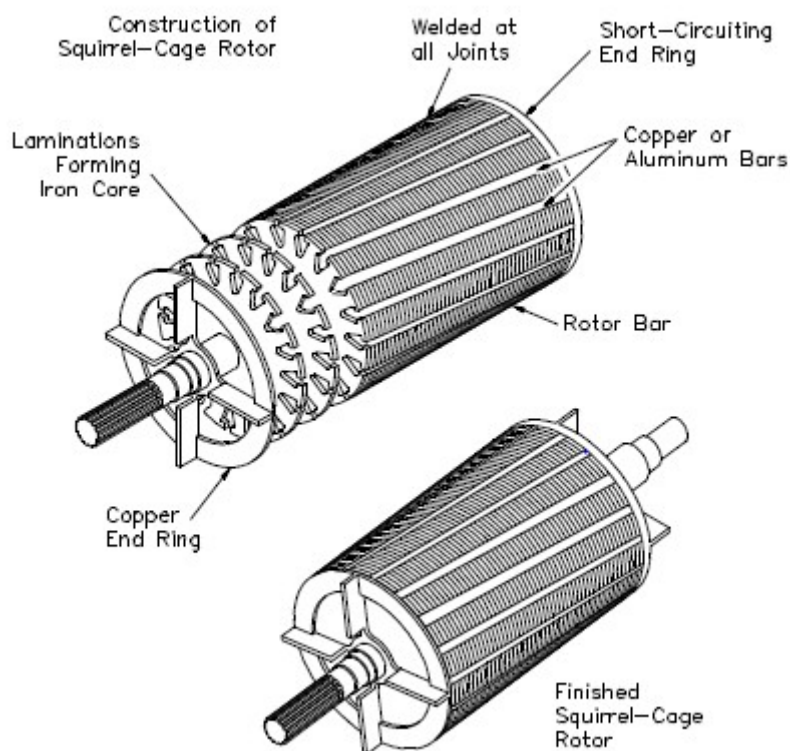


Figura 4.1 Rotor motor d'inducció

El rotor és un cilindre format per una sèrie de xapes apilades que tenen unes ranures a l'exterior on es col·loca el bobinat. El rotor en un motor d'inducció pot ser de dos tipus, en forma de gàbia d'esquirol o curtcircuitat i rotor bobinat. En aquest projecte s'utilitzen motors d'inducció amb rotor gàbia d'esquirol, per tant només s'explicarà aquest tipus de rotor. El rotor en gàbia d'esquirol està format per unes barres de coure o alumini unides per uns anells laterals que les curtcircuiten.

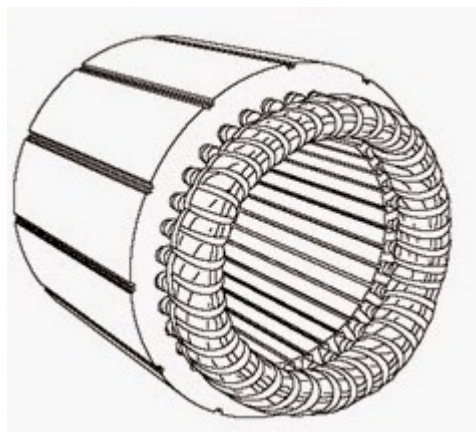


Figura 4.2 Estator motor d'inducció

Els motors d'inducció poden estar connectats en connexió estrella o triangle en funció del sistema de connexió dels seus bobinats. Aquests dos sistemes de connexió s'utilitzen depenent de la funció que ha de realitzar el motor. La connexió en estrella s'utilitza quan el motor està connectat a la tensió més elevada indicada a la placa de característiques, utilitzant la connexió en triangle per la tensió més baixa.[4]

4.2.1.2 Funcionament

El bobinat trifàsic que forma l'estator està construït per tres bobinats desfasats 120° en l'espai i de, p , parelles de pols. Quan s'alimenten els bobinats amb una xarxa trifàsica amb freqüència, f_1 , es produeix una força electromagnètica rotativa que produeix un flux giratori a velocitat, n_1 . Aquesta velocitat angular s'anomena velocitat de sincronisme, ve donada en (rpm) i s'obté de la següent fórmula. [4]

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (4.1)$$

Aquest flux magnètic induirà forces electromagnètiques als conductors del rotor que el faran girar, per això el gir del rotor serà del mateix sentit que el gir del camp magnètic. La velocitat de sincronisme és el límit teòric al qual pot arribar el rotor, però a la realitat el rotor mai podrà girar a la velocitat de sincronisme, per tant la seva velocitat de règim és asíncrona, per aquest motiu als motors d'inducció també se'ls anomena motors asíncrons. El lliscament, s , d'un motor permet quantificar la diferència entre la velocitat de sincronisme i la velocitat real de rotació, n . [3][5]

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4.2)$$

Quan el parell que té la càrrega del motor és superior al parell intern del motor, la velocitat de gir del rotor disminueix i amb conseqüència el lliscament tendeix a augmentar.

El parell motor és el moment de rotació que exerceix un motor sobre el seu eix de transmissió. El càlcul del parell s'obté del quocient de la potència per la velocitat. Utilitzant la nomenclatura mencionada anteriorment, on P_u és la potència útil i n és la velocitat de rotació, el parell T es calcula amb la fórmula següent. En sistema internacional parell s'expressa en Nm.

$$T = \frac{P_u}{2\pi \frac{n_1(1-s)}{60}} \quad (4.3)$$

4.2.1.3 Circuit equivalent

El circuit equivalent d'un motor d'inducció ajuda a entendre més fàcilment el seu funcionament sense que aparegui l'acció transformadora entre els circuits de l'estator i del rotor, de manera que es facilita la comprensió del circuit de forma considerable. Per simplificar el circuit es representa només una de les tres fases, ja que les altres dues són completament iguals. A la figura 4.3 es mostra el circuit equivalent d'una fase d'un motor d'inducció.

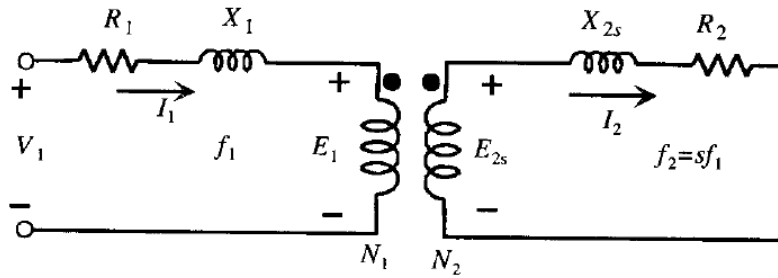


Figura 4.3: Circuit equivalent motor d'inducció

Font: Máquinas Eléctricas, Jesus Fraile Mora

En aquesta figura es pot observar com la tensió d'alimentació V_1 alimenta directament l'estator, de manera que ha de vèncer la impedància interna del bobinat, formada per la resistència R_1 i la inductància X_1 . Els bobinats E_1 i E_{2s} representen els bobinats de l'estator i del rotor respectivament. La impedància del bobinat del rotor està representada per la inductància X_{2s} i la resistència R_2 . Com es pot observar el bobinat del rotor està curtcircuitat.

Com s'ha explicat en l'apartat de funcionament d'un motor d'inducció, quan el corrent I_1 circula pel bobinat E_1 genera un flux magnètic que indueix el corrent I_2 al bobinat E_{2s} , que a l'estar curtcircuitat genera una rotació sobre si mateix.

Desenvolupant el circuit equivalent anterior s'obté el circuit equivalent de la figura 4.4 que representa d'una manera més simplificada el funcionament del motor. [3]

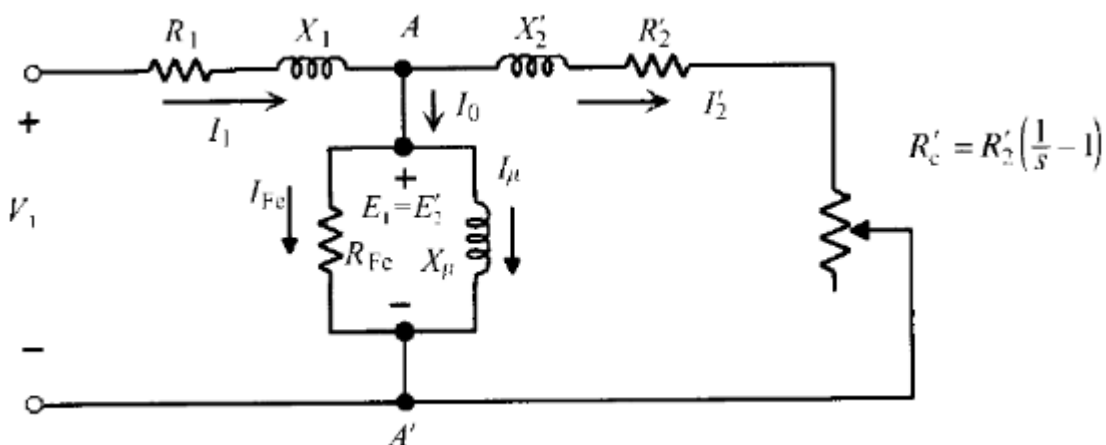


Figura 4.4 Circuit equivalent simplificat

Font: Máquinas Eléctricas, Jesus Fraile Mora

4.2.1.4 Balanç de potències

Un motor d'inducció s'utilitza per convertir energia elèctrica en energia mecànica, però no tota l'energia que s'introdueix es converteix en energia mecànica, ja que afecten les diferents pèrdues que pot tindre. Les pèrdues en aquests motors es poden separar en tres grups: l'energia dissipada per l'estator P_{p1} , l'energia dissipada pel rotor P_{p2} i les pèrdues mecàniques per fregament i ventilació P_m . L'energia dissipada per l'estator consisteix en la suma de l'energia dissipada en forma de calor en el bobinat de l'estor i les pèrdues ferromagnètiques generades en el ferro que forma l'estator.

L'energia dissipada pel rotor consisteix bàsicament en l'energia dissipada en forma de calor del bobinat del rotor, ja que les pèrdues en el ferro es consideren menyspreables perquè les freqüències dels corrents que circulen pel rotor són de valors molt baixos.

Finalment la potència mecànica que es pot utilitzar, P_u , és la resta de la consumida pel motor, P_1 , menys la suma de totes les pèrdues.

$$P_u = P_1 - P_{p1} - P_{p2} - P_m \quad (4.4)$$

A la figura 4.5 es representa el diagrama de flux de les potències en el cas d'un motor funcionat en règim de motor.

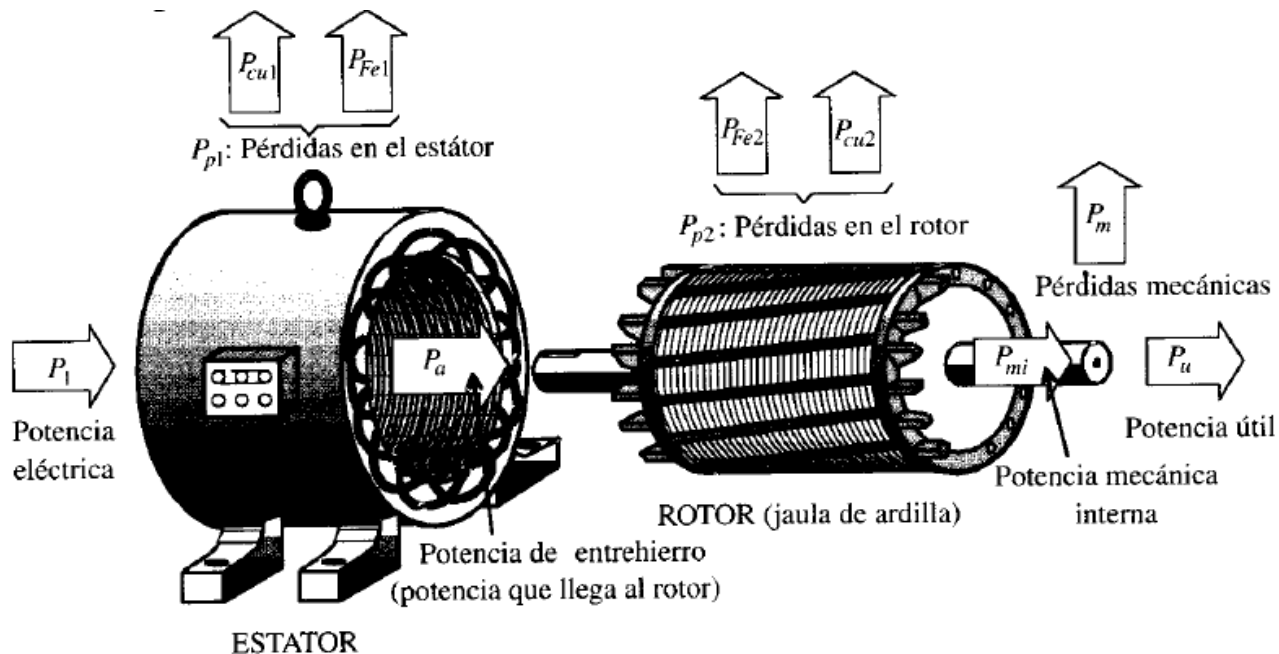


Figura 4.5 Esquema de les pèrdues en un motor d'inducció

Font: Máquinas Eléctricas, Jesus Fraile Mora

4.2.2.5 Modes de funcionament

Un motor d'inducció pot treballar en tres zones diferents: en règim de motor, en règim de generador o en règim de fre. En aquest apartat s'expliquen els dos primers mode, ja que són els dos règims de funcionament en què es farà treballar els motors en aquest treball. Les tres zones de funcionament del motor vénen definides per la representació de la corba parell-velocitat o parell-lliscament mostrada a la figura 4.6. En aquesta corba es pot veure el comportament d'un motor en funció de la seva velocitat i el seu parell.

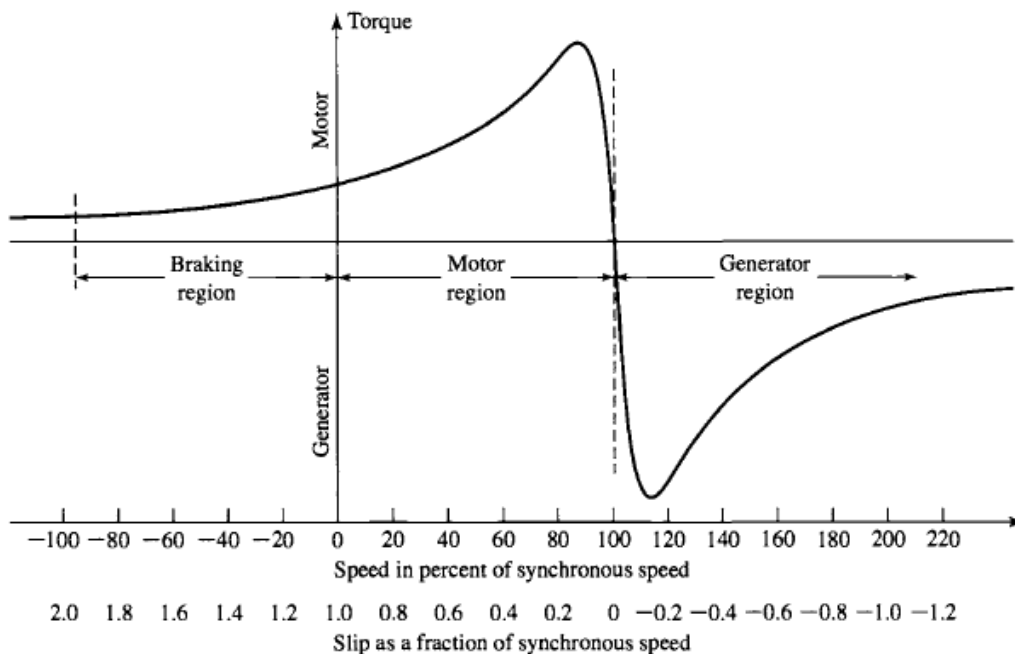


Figura 4.6 Corba parell-velocitat o parell-lliscament

Font: Electric Machinery, A.E.Fitzgerald

- Règim motor:

Un motor d'inducció funciona com a motor quan l'energia elèctrica és convertida en energia mecànica. A la corba parell-velocitat s'observa que quan un motor està en aquest règim de funcionament la seva velocitat està comprimida entre 0 i la velocitat de sincronisme s_1 . Ja que la velocitat de rotació sempre serà inferior a la velocitat de sincronisme el lliscament es situa amb valors entre 1 i 0. Quan un motor treballa amb aquests valors de lliscament la potència mecànica interna és positiva, per tant el motor està transmetent energia al seu eix de rotació. De manera que en aquest mode de funcionament l'energia es transmet de l'estator al rotor.

En la següent imatge es representen els diferents punts de funcionament en règim motor.

- Punt de funcionament O. Funcionament de sincronisme: Com s'ha mencionat anteriorment aquest punt de funcionament no es pot complir en la realitat perquè la velocitat del rotor mai podrà ser igual a la velocitat de sincronisme, per això aquest punt es considera teòric. En cas que un motor giri a la velocitat de sincronisme el seu parell seria igual a zero.

- Règim generador:

Un motor funciona en règim generador quan l'energia mecànica es converteix en energia elèctrica.

Com es pot observar en la figura 4.6, quan un motor funciona com a generador la seva velocitat de rotació és superior a la velocitat de sincronisme, i per tant el lliscament és negatiu. De manera que el parell proporcionat per la màquina és un parell de frenat respecte al moment de rotació de l'eix.

Quan un motor d'inducció es comporta com a generador la potència mecànica interna és negativa, ja que està absorbint energia mecànica per l'eix, per tant la transferència d'energia es produeix de rotor a estator.

En la figura 4.5 representa balanç de potències d'un motor funcionant com a motor, en el cas d'un motor funcionant com a generador el sentit de les fletxes horitzontals és el contrari.

Els punts de funcionament d'un generador són els mateixos que els d'un motor però amb parell negatiu, ja que com es pot observar a l'equació 4.3, si la potència interna és negativa, el parell és negatiu.

4.2.2 Justificació del funcionament del projecte

En aquest apartat es justificarà el funcionament mecànic i elèctric d'aquests dos motors i quines són les característiques que permeten que el muntatge funcioni correctament.

Com s'ha explicat en l'apartat 3, la proposta realitzada consta de dos motors d'inducció acoblats mecànicament, un dels quals funciona en règim de generador i l'altre en règim de motor. Per aconseguir aquests modes de funcionament s'assignen velocitats de sincronisme diferents als dos motors, de manera que la velocitat real de gir real es trobi entre aquestes dues velocitats. Cadascun d'aquests motors anirà connectat a un *inverter* que permet variar les

velocitats de sincronisme i per tant controlar les diferències de velocitat que es tenen en cada instant.

Motor en règim de motor:

El motor alimentat per l'*inverter* de prova treballa en règim de motor amb l'objectiu que l'equip funcioni de forma equivalent al seu funcionament a la fàbrica.

Com s'ha explicat en l'apartat anterior quan un motor funciona en règim de motor la seva velocitat de gir és inferior a la velocitat de sincronisme, de manera que a aquest motor se li assignarà una velocitat de gir superior a la del motor controlat per l'altre *inverter*. D'aquesta manera la velocitat de sincronisme serà superior a la velocitat real de gir.

Utilitzant l'equació 4.2, s'observa que quan la velocitat de gir decreix mantenint la velocitat de sincronisme el lliscament també augmenta. Com es pot observar a la figura 4.6 un increment del lliscament comporta un augment del parell motor.

Aïllant la potència útil de l'equació 4.3 s'obté la següent equació:

$$P_u = T \, 2\pi \, \frac{n}{60} \quad (4.5)$$

Amb aquesta equació s'observa que un increment del parell T i de la velocitat n provoquen un augment a la potència útil. Com s'ha vist a l'equació 4.4, la potència elèctrica d'entrada del motor és la suma de la potència útil i de les pèrdues per tant aquest increment de la potència útil comporta un augment de la potència elèctrica d'entrada.

L'alimentació del motor prové directament de l'*inverter* de manera que les variacions de la potència d'entrada del motor afectaran directament a la potència que subministra l'equip.

Com s'ha explicat en l'apartat 2.2 un motor d'inducció ha de mantenir la relació tensió freqüència per conservar la seva estabilitat, de manera que seguint la llei d'Ohm, l'increment de la potència elèctrica d'entrada del motor correspondrà a un increment del corrent consumit. La figura 4.8 representa com afecta la variació del parell i la velocitat de gir a un motor amb tensió i freqüència constant. Per representar i quantificar la magnitud dels valors obtinguts en aquesta figura s'ha representat el funcionament d'un motor de 7,5 kW, ja que té un comportament semblant als motors que s'utilitzen en aquest projecte que tenen una potència similar.

En aquest apartat només es valora el funcionament del motor en la zona de treball que compren lliscaments d'entre 0 i 1, degut a que és la zona de treball on el motor funciona en règim de motor. Com s'ha explicat el l'apartat anterior, un motor d'inducció és inestable quan el seu lliscament és superior al lliscament corresponent al parell màxim, de manera que el motor utilitzat en aquest projecte sempre funcionarà en la zona de treball compresa entre aquest lliscament i el lliscament corresponent a la velocitat de sincronisme.

A la figura 4.8 s'observa com el corrent disminueix en funció que el lliscament disminueix, de manera que el corrent serà menor si la velocitat de gir del motor s'aproxima a la velocitat de sincronisme. Considerant que el motor treballa en la zona estable de la gràfica, el corrent màxim que consumeix el motor correspon a l'instant de parell màxim del motor.

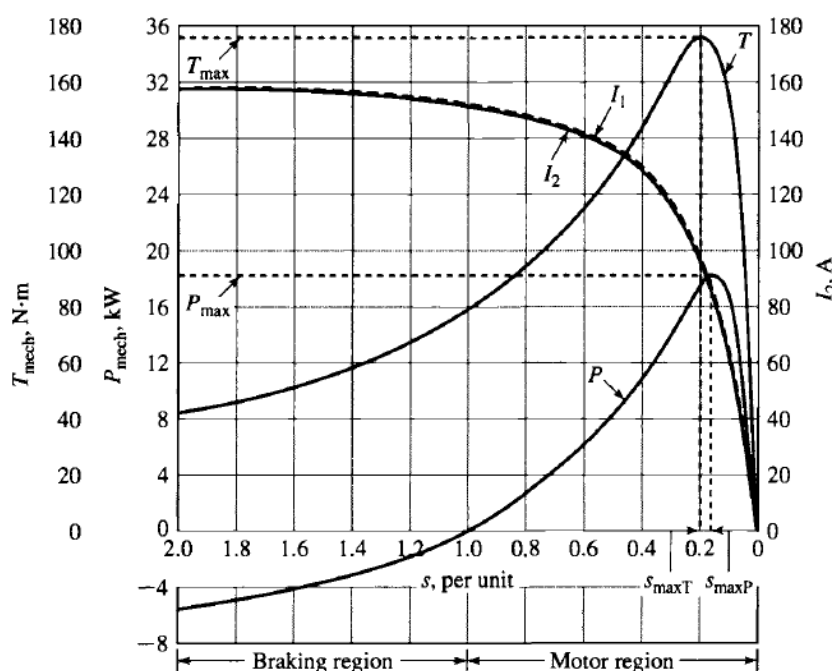


Figura 4.8 Corbes de corrent, parell i potència.

Font: Electric Machinery A.E.Fitzgerald

Finalment, el funcionament principal del motor alimentat per l'inverter de prova consisteix en què la seva velocitat de gir sigui inferior a la velocitat de sincronisme però superior a la velocitat corresponent al parell màxim per mantindre la seva estabilitat. Augmentant la diferència entre la velocitat de gir i la velocitat de sincronisme s'augmenta la potència elèctrica consumida i per tant s'augmenta la potència de treball de l'inverter que el controla.

Motor en règim de generador:

El motor alimentat per l'*inverter* incorporat en el muntatge funciona en règim de generador, ja que la seva velocitat de gir és superior a la velocitat de sincronisme. La funció principal d'aquest motor és convertir l'energia mecànica generada pel motor que funciona en règim de motor en energia elèctrica que pot ser reutilitzada.

Utilitzant l'equació 4.2, quan la velocitat real de gir és superior a la velocitat de sincronisme el lliscament adopta valors negatius, en conseqüència i observant la figura 4.6, el treball motor també passa a ser inferior a zero.

Aplicant els valor del parell i la velocitat a l'equació 4.5, s'obté que un treball de valor negatiu comporta una potència útil negativa. Quan una potència té valors inferiors a zero indica que el flux d'energia circula en sentit contrari. Per això s'ha realitzat la figura 4.9 que representa el balanç de potències d'un motor d'inducció en règim generador.

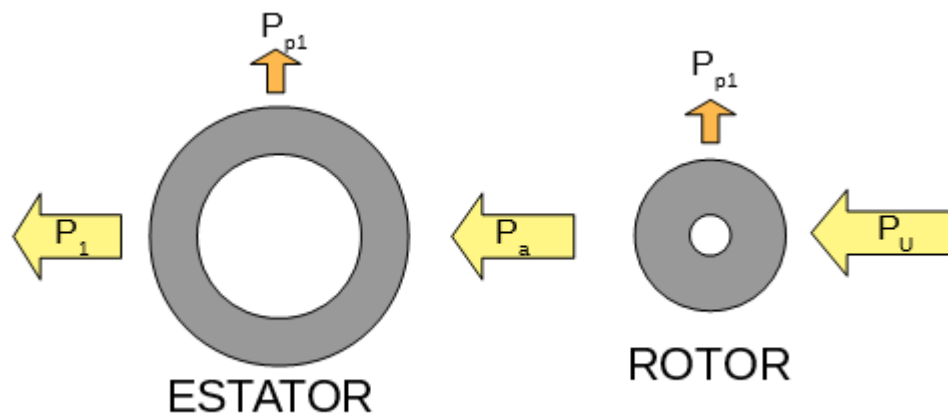


Figura 4.9 Balanç de potències generador

Tal com s'observa a l'equació 4.4, la potència elèctrica P_1 del motor és funció de la potència útil P_u i de les pèrdues, en el cas d'un motor amb règim generador el valor de la potència subministrada és de signe negatiu igual que la potència útil, ja que aquestes potències tenen sentit invers al de les potències d'un motor en règim de motor.

L'energia que rep el motor que funciona en règim generador prové de l'energia que transmet el motor en règim de motor, de manera que si el sistema fos ideal i no es consideressin les pèrdues produïdes pels motors l'energia generada pel motor generador seria la mateixa que l'entregada pel motor. En termes pràctics, la potència generada pel generador sempre tindrà valors inferiors a l'energia generada pel motor.

Connexió dels *inverters*:

Com s'ha explicat resumidament en l'apartat 3.2, els dos *inverters* que alimenten els motors es connecten mitjançant els seus busos de contínua, de manera que s'aconsegueix que l'energia generada pel motor amb règim de generador arribi al motor principal. En aquest apartat es justificarà el comportament dels *inverters* davant d'aquests fets.

Inverter de prova:

Degut a que l'objectiu d'aquest projecte és testear *inverters* per verificar el seu correcte funcionament a les fàbriques, la funció principal dels equips de prova en aquest muntatge és alimentar un motor d'inducció controlant la seva velocitat de gir.

Com s'ha explicat amb anterioritat la velocitat que assignarà aquest equip ha de ser lleugerament superior a la velocitat que assigna l'*inverter* incorporat al sistema, de manera que la velocitat real de gir dels equips es trobi en un terme mitjà entre les dues velocitats. L'increment de la diferència entre la velocitat de gir d'un motor i la velocitat de sincronisme, incrementa la potència consumida per aquest motor, en conseqüència es produirà un augment de la potència subministrada per l'*inverter*.

Inverter incorporat en el sistema:

Aquest equip està connectat al motor d'inducció que funciona en règim de generador de manera que la velocitat de gir que assigna al motor ha de ser inferior a la velocitat de gir assignada per l'*inverter* de prova. En aquest cas l'equip no funciona amb el seu propòsit inicial sinó que s'utilitza per convertir l'energia que rep del motor.

En la primera etapa de funcionament l'equip funciona com un *inverter* normal, ja que la seva alimentació prové de la xarxa trifàsica convertint aquest corrent trifàsic en el corrent continu que alimenta el Bus DC. La diferència radica en què quan el sistema està funcionant en règim estable el motor envia energia cap a l'equip. L'*inverter* rep una ona trifàsica provinent del motor generador, aquesta ona arriba als punts mitjans dels IGBTs de l'inversor. L'equip rectifica l'ona de corrent altern a una ona de corrent continu mitjançant els díodes en antiparal·lel que permeten la conducció en sentit invers al semiconductor.

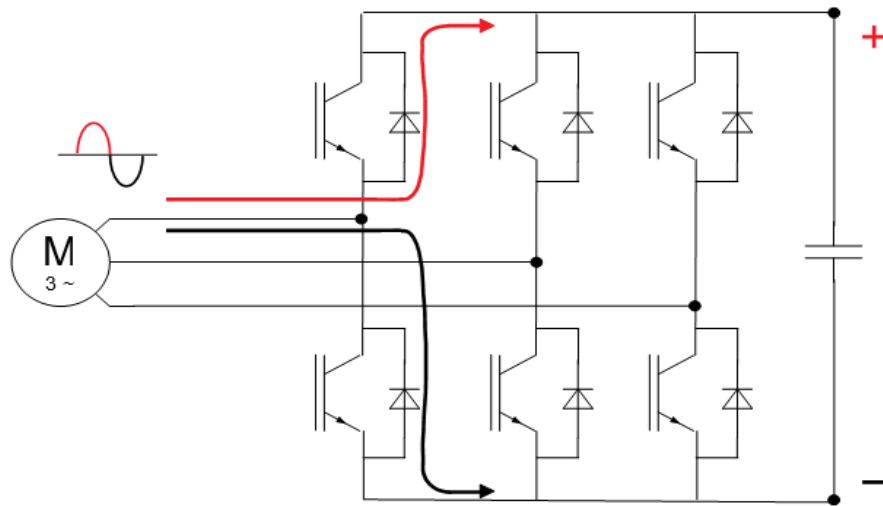


Figura 4.10 Rectificació de l'energia generada pel motor mitjançant inversors

La figura 4.10 representa gràficament el funcionament del rectificador mitjançant els díodes en antiparal·lel, on la part positiva de l'ona es rectifica pels díodes superiors i la part negativa de l'ona es rectifica pels díodes inferiors. El corrent subministrat pel motor generador arriba als condensadors del bus de contínua de l'inverter causant un increment de la tensió en bornes d'aquests condensadors. Atès que l'alimentació del bus de contínua de l'inverter es realitza mitjançant el rectificador de la xarxa trifàsica, el corrent provinent del motor provocarà un increment de la tensió del Bus DC per sobre dels nivells normals. Un increment elevat de la tensió al bus podria fer malbé l'aparell, ja que no està dissenyat per suportar tensions tan elevades. Existeixen equips que disposen d'un sistema amb resistències de frenat, que permeten dissipar l'energia sobrant per evitar sobre pics de tensió.

En un sistema teòric, menyspreant les pèrdues en els motors, l'energia que genera el motor generador ha de ser igual que l'energia que consumeix el motor. Per tant el sistema no consumiria energia de la xarxa, ja que tota l'energia consumida pel motor provindria del motor generador. A la pràctica les pèrdues als motors provoquen que l'energia subministrada pel motor generador sempre sigui inferior a l'energia consumida pel motor, així que l'inverter de prova tindrà un consum energètic equivalent a les pèrdues dels dos motors i dels dos onduldors dels inverters.

A la figura 4.11 es mostra el balanç d'energia del sistema. Com es pot observar el consum de la xarxa equival a les pèrdues dels motors i del sistema.

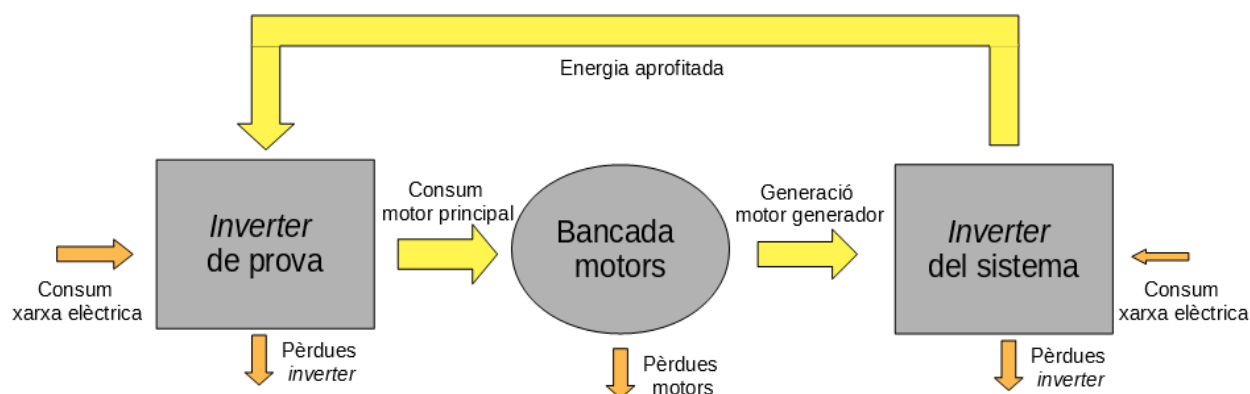


Figura 4.11 Balanç d'energia sistema

4.2.3 Proves inicials del funcionament del sistema

Prèviament a l'estudi i disseny del muntatge construït en aquest projecte, s'ha realitzat unes proves que permeten confirmar de forma orientativa que l'objectiu del sistema es compleix. Per realitzar aquestes proves s'ha intentat reproduir el funcionament del muntatge definitiu, de manera que s'ha utilitzat els màxims elements possibles que formaran el sistema final. Aquestes proves consisteixen en connectar dos *inverters* a una bancada de motors d'inducció de la mateixa forma que es mostra a l'esquema de la figura 3.2. La prova realitzada consisteix a simular el funcionament final del sistema, per tant s'assignen diverses velocitats de gir als motors corresponents a diferents modes de funcionament del muntatge. S'ha pres diverses mesures que permeten documentar i comprendre com es comporta el muntatge, aquestes mesures permeten quantificar de forma orientativa l'estalvi energètic que s'obté.

4.2.3.1 Elements del muntatge de prova

La bancada de motors utilitzada està formada per dos motors d'inducció idèntics acoblats mecànicament. Aquests motors tenen les següents característiques:

- **Potència màxima:** 10 HP, que elèctricament equivalen a 7,5 kW.
- **Parells de pols:** 2
- **Corrent màxim:** 15,4 A.
- **Velocitat màxima:** 1450 rpm.

Un dels dos *inverters* utilitzats en aquesta prova és l'equip que s'utilitzarà en el muntatge definitiu, es tracta d'un *inverter* de la marca OMRON amb les següents característiques:

- **Potència màxima** aplicada al motor: 37 kW
- **Freqüència màxima** d'alimentació del motor: 50 Hz
- **Freqüència de modulació:** 15 kHz

L'altre equip utilitzat és un *inverter* de la marca Vectron amb les següents característiques:

- **Potència màxima** aplicada al motor: 20 kW
- **Freqüència màxima** d'alimentació del motor: 50 Hz
- **Freqüència de modulació:** 2 kHz

Amb l'objectiu de controlar el funcionament d'aquesta prova s'ha decidit col·locar una sèrie d'interruptors que permeten controlar les alimentacions dels elements del sistema. Per realitzar aquest control s'ha decidit utilitzar interruptors magnetotèrmics amb els quals es realitza un control manual i proporcionen una seguretat contra els corrents elevats. En aquest cas s'ha decidit col·locar els següents interruptors:

- Un interruptor a l'entrada trifàsica del sistema, que permet controlar l'alimentació del sistema complet.
- Un interruptor a l'entrada de cadascun dels *inverters* que permet controlar l'alimentació dels equips. Un control de l'alimentació per separat permet alimentar individualment un *inverter* amb l'objectiu de comprovar exclusivament el funcionament d'aquest equip amb el motor en buit.
- Un interruptor situat entre els dos Busos DC dels *inverters* de manera que permet controlar la seva connexió i desconexió.

4.2.3.2 Obtenció de dades

L'objectiu d'aquesta prova és obtenir les màximes dades possibles que ajudin a corroborar el correcte funcionament, aquestes dades es reuneixen a la taula 4.1. Val a dir que els valors representats en aquesta taula són simplement orientatiu, ja que el mètode d'obtenció d'aquestes dades no proporciona l'exactitud suficient.

Per les mesures de corrent s'ha utilitzat una pinça amperimètrica de la marca Kaise. Amb l'objectiu de verificar que els valors obtinguts amb la pinça s'aproximen al valor real s'ha mesurat el mateix corrent amb un amperímetre analògic de la marca Zurc i s'ha observat que el resultat era aproximadament el mateix, tot i que la pinça proporciona més exactitud. Pel fet que l'alimentació dels motors es realitza mitjançant una ona modulada, el seu corrent té un cert rissat que s'ha de tindre en compte, ja que pot generar una variació de les pèrdues en els motors. Per mesurar aquest rissat s'ha utilitzat una pinça amperimètrica amb connexió BNC de la marca Fluke, que s'ha connectat a un oscil·loscopi.

Les úniques tensions mesurades són les de l'alimentació del motor. Aquestes mesures s'han pres perquè multiplicant el seu valor pel valor del corrent mesurat a la sortida de l'*inverter* s'obté una mesura aproximada de la potència consumida pel motor. Les mesures s'han realitzat mitjançant un multímetre digital de la marca Fluke. El valor mesurat és simplement orientatiu, ja que l'ona enviada al motor està modulada mitjançant el mètode de modulació PWM i per obtenir el valor eficaç real s'hauria d'utilitzar un filtre que atenués les modulacions.

Pel que fa a les velocitats de gir dels eixos dels motors s'han mesurat mitjançant un tacòmetre digital.

4.2.3.3 Funcionament del muntatge de prova

En aquestes proves s'ha utilitzat els dos equips per realitzar les dues funcions, de manera que es comprova que el sistema funciona independentment de l'equip utilitzat. Per aconseguir resultats més òptims s'ha procurat que els *inverter* treballin a la freqüència màxima, ja que observant la corba tensió-freqüència dels motors és la zona de treball més adequada. En el cas dels *inverters* utilitzats en aquestes proves la freqüència màxima és de 50 Hz, que utilitzant l'equació 4.1 i sabent que els motors utilitzats són de 2 parells de pols, correspon a una velocitat de gir dels motors de 1500 rpm.

La prova es divideix en tres assajos:

- **Funcionament dels equips per separat:** Aquest primer assaig consisteix a observar com es comporten els *inverters* quan els motors treballen sense cap càrrega. Per aconseguir-ho s'ha alimentat individualment cada *inverter* i s'ha fet girar el motor a la velocitat màxima permesa. També s'ha realitzat una prova en què s'assigna la mateixa velocitat de gir als dos motors, de forma que cap dels dos està proporcionant càrrega a l'altre. L'objectiu d'aquest assaig és obtenir dades bàsiques del comportament dels equips amb rotor lliure per posteriorment poder analitzar correctament el comportament dels equips amb càrrega. (Aquesta prova només es realitza per obtenir

dades del funcionament dels *inverters* sense càrrega, però al sistema definitiu no es podrà utilitzar aquest mode de funcionament)

- **Assaig de l'inverter Vectron amb càrrega:** Aquest assaig consisteix en assignar la velocitat màxima de gir al motor alimentat per l'inverter Vectron i disminuir progressivament la velocitat assignada al motor alimentat per l'inverter Omron. Aquest funcionament permet provar l'inverter Vectron a potències elevades i que l'inverter Omron recuperi l'energia. Aquest mètode de funcionament és el que s'utilitzarà en el muntatge definitiu per testejar el funcionament dels equips.
- **Assaig de l'inverter Omron amb càrrega:** Aquest assaig es exactament igual que l'assaig de l'inverter Vectron amb càrrega però en aquest cas s'assignarà una velocitat superior a l'inverter Omron que al Vectron i per tant l'equip que s'estarà provant és el de la marca Omron.

Per modificar les freqüències d'alimentació dels *inverters* s'ha utilitzat uns *displays* incorporats als equips, que permeten variar la freqüència amb una precisió de 0,1 Hz.

Al ser dos *inverters* de marques i models diferents, la rampa d'arrancada dels motors estava programada amb un pendent diferent, de manera que s'ha hagut de reprogramar la rampa per evitar que a l'arrancar els motors la diferencia de freqüències d'alimentació pogués produir un excés de corrent.

4.2.3.4 Resultats obtinguts

En aquest apartat es comentarà i justificarà els resultats obtinguts i representats a la taula 4.1.

En primer lloc es pot observar com en alguns casos el valor eficaç de les tensions d'alimentació dels motors superen els 400 V, valors que a la pràctica no es poden arribar a donar, ja que la tensió de sortida dels equips en cap cas pot ser superior a la tensió d'alimentació. Aquest fet es produeix perquè la forma de mesurar aquestes tensions no és la més adequada. Tot i això aquestes dades representen aproximadament que la relació tensió freqüència de l'inverter es compleix, ja que quan es disminueix la freqüència d'alimentació la tensió tendeix a disminuir. La diferencia de les tensions d'alimentació d'un motor a l'altre es deu al fet que les freqüències de commutació són molt diferents, de manera que el valor eficaç de la tensió d'alimentació del motor alimentat per l'inverter Omron s'aproxima millor al valor eficaç real perquè la seva freqüència de commutació és més elevada.

En segon lloc s'observa com en les dues proves en motor en buit, el corrent consumit pel motor en buit és més elevat que el corrent consumit per motor en càrrega, això succeeix

perquè quan un motor d'inducció està treballant en buit la seva resistència de càrrega adopta un valor elevat, de manera que la potència consumida pel motor té una component reactiva molt elevada. Com s'observa a la gràfica de la figura 4.12 el factor de potència d'un motor d'inducció amb càrrega igual a zero té un valor molt baix, per tant gairebé tota la potència aparent prové de la potència reactiva.

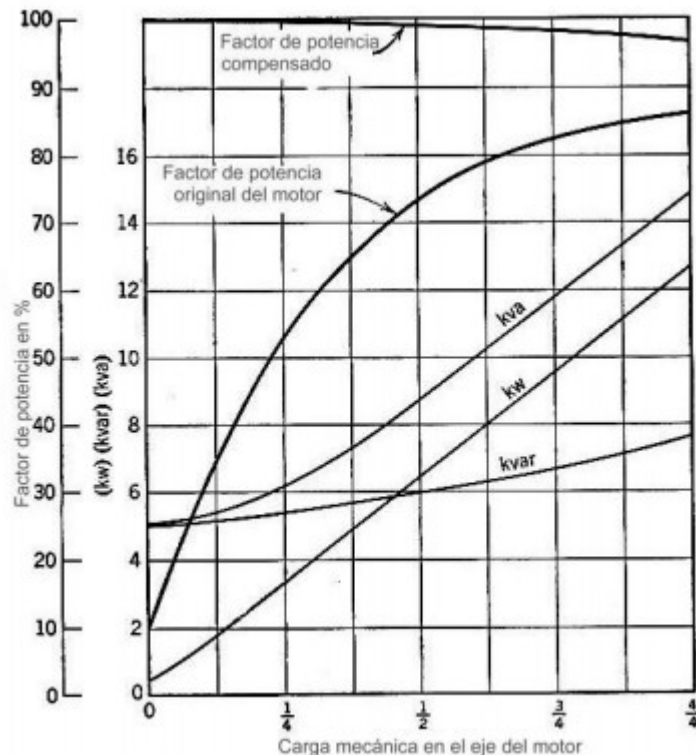


Figura 4.12 Corba factor de potència en funció de la càrrega

Font: Leyden Boletín Técnico BT002 [11]

Com es pot comprovar el corrent consumit per l'*inverter* Omron sempre és lleugerament superior al corrent consumit per l'equip Vectron, això succeeix, ja que l'equip Omron està preparat per treballar a potències més elevades i el seu circuit de control té un consum més elevat. També s'ha de considerar que aquest equip disposa de resistències d'equilibrat i de descàrrega del Bus DC que produeixen un increment del consum comparat amb l'*inverter* Omron.

Respecte a l'estalvi energètic, els assajos 2 i 3 confirmen que amb el muntatge d'aquest sistema s'aconsegueix reduir el consum provinent de la xarxa, ja que com es pot observar a la taula 4.1 el corrent consumit pels equips sempre és inferior al corrent consumit pels motors.

Com s'ha explicat anteriorment, quan s'assignen velocitats diferents als motors un d'ells funciona en règim de motor i per tant consumeix energia del seu *inverter* i l'altre funciona en règim de generador i per tant envia energia al seu *inverter*. En termes teòrics la potència consumida pel motor ha de ser igual que la potència generada pel generador, però a la pràctica això no es compleix per culpa de les pèrdues que tenen els motors i els ondulators dels *inverters*, de manera que la potència generada sempre és inferior a la potència consumida. Aquesta afirmació s'observa a la taula 4.1 de forma que el corrent consumit pel motor és sempre superior al corrent generat pel motor generador. Considerant que la tensió es manté constant per mantenir la relació tensió-freqüència, la diferència entre el corrent consumit i el corrent generat representa les pèrdues de potència obtingudes. Com s'observa les pèrdues en els motors tendeixen a augmentar amb l'augment de la diferència de les freqüències d'alimentació, això es produeix a causa de què les pèrdues són funció del parell, de manera que si el parell augmenta, les pèrdues també ho fan.

Un fet destacable és que les pèrdues també varien en funció de quin *inverter* alimenta el motor i quin alimenta el generador. Com es pot veure, quan l'equip Omron assigna una velocitat superior a la que assigna l'equip Vectron la diferència entre el corrent consumit i el corrent generat és més elevada. Aquest fet es deu que l'*inverter* Omron té una freqüència de modulació molt més elevada que la de l'*inverter* Vectron, de manera que l'ona d'alimentació del motor té més commutacions i per tant unes pèrdues més elevades. Per quantificar aquesta diferència en la freqüència de commutació s'ha mesurat la tensió entre dues de les fases dels motors mitjançant un oscil·loscopi, els resultats obtingut es mostra a les figures 4.13 i 4.14.

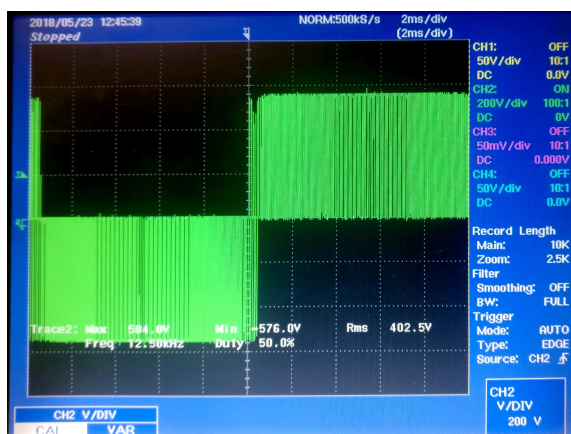


Figura 4.13: Tensió entre fases motor alimentat per l'*inverter* Omron



Figura 4.14: Tensió entre fases del motor alimentat per l'*inverter* Vectron

Per avaluar la forma d'ona del corrent que els equips envien als motors, s'ha utilitzat una pinça amperimètrica connectada a un oscil·loscopi. Amb l'objectiu de poder comparar les mesures entre els dos equips s'han assignat unes freqüències d'alimentació que corresponen a

un corrent consumit pel motor de 5 A. Els resultats obtinguts es mostren a les figures 4.15 i 4.16.

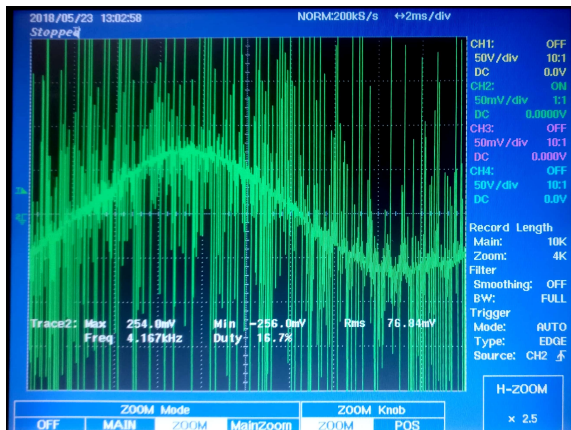


Figura 4.15: Corrent per una fase del motor alimentat per l'inverter Omron

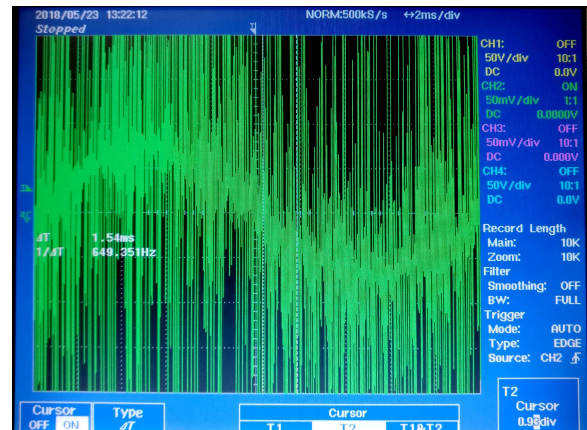


Figura 4.16: Corrent per una fase del motor alimentat per l'inverter Vectron

A l'obtenir l'ona del corrent amb una pinça amperimètrica el soroll captat és molt elevat però tot i aquest soroll es pot observar com la forma d'ona del corrent és sinusoidal. La imatge presa a la figura 4.15 està filtrada, ja que al tenir l'inverter una freqüència de commutació tan elevada el soroll distorsionava molt la interpretació de l'ona.

A l'estar el motor alimentat amb una ona modulada es produeix un rissat a l'ona del corrent, com el representat a la figura 2.7. Aquest rissat és important, ja que si el seu valor pic a pic és molt elevat l'ona del corrent té una forma menys sinusoidal. Per avaluar el rissat en aquesta prova s'ha ampliat l'ona del corrent fins que s'ha pogut apreciar el rissat de l'ona. En el cas del corrent consumit pel motor alimentat per l'inverter Omron aquest rissat no s'ha pogut visualitzar, ja que la seva freqüència de modulació genera que el rissat tingui una freqüència tan elevada que és pràcticament impossible de visualitzar. En canvi ampliant el corrent consumit pel motor connectat a l'inverter Vectron sí que s'ha pogut visualitzar el rissat i es representa a la figura 4.17.

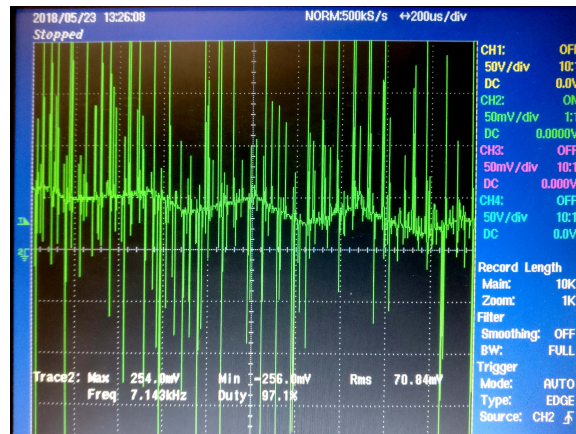


Figura 4.17: Rissat del corrent en el motor alimentat per l'inverter Vectron

Calculant el valor de pic a pic del rissat i obtenint el percentatge respecte el valor de pic de l'ona de corrent, s'obté que el rissat significa aproximadament un 30% del valor de l'ona.

4.2.3.5 Conclusions de la prova

Amb els resultats obtinguts es considera que la prova ha resultat satisfactòria, ja que es compleix l'objectiu principal de reduir el consum energètic de la xarxa en testejar *inverters*.

Per quantificar l'estalvi energètic s'ha calculat el percentatge d'energia estalviat en el cas en què la freqüència d'alimentació del motor alimentat per l'inverter Omron és de 41 Hz i la del motor alimentat per l'inverter Vectron és de 50 Hz. S'ha escollit aquest cas perquè és el cas on es fa treballar a l'equip a una potència més elevada i que simula millor el funcionament final del muntatge, ja que l'inverter Vectron és el que s'està testejant. Tenint en compte que el corrent total consumit pel sistema, I_T , és la suma dels corrents consumits pels dos equips, que el corrent consumit pel motor, I_S , és el corrent corresponent a la columna 'Corrent motor Vectron' i que la tensió de línia és de 400 V, s'han realitzat els següents càlculs.

$$P_S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_S = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 6,94 = 4,81 \text{ kW}$$

$$P_M = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_M = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 13 = 9 \text{ kW}$$

$$P_E = P_M - P_S = 9 - 4,81 = 4,19 \text{ kW}$$

On P_S és la potència consumida pel sistema, P_M és la potència consumida pel motor i P_E és la potència estalviada.

Per tant en aquest cas s'ha estalviat 4,19 kW que correspon a un estalvi energètic del 46,6%.

f Omron	f Vectron	Corrent entrada Omron	Corrent entrada Vectron	Corrent motor Omron	Corrent motor Vectron	Tensió motor Omron	Tensió motor Vectron	Velocitat
Assaig 1								
50 Hz	-	0,8 A	-	1,55 A	-	415 V	-	1495 rpm
-	50 Hz	-	0,98 A	-	1,8 A	-	440 V	1496 rpm
50 Hz	50 Hz	0,78 A	0,59 A	1,5 A	1,77 A	415 V	445 V	1500 rpm
Assaig 2								
50 Hz	49 Hz	0,85 A	0,58 A	2,65 A	2,15 A	415 V	448 V	1480 rpm
50 Hz	48 Hz	1,15 A	0,6 A	4,45 A	3,15 A	418 V	438 V	1460 rpm
50 Hz	47 Hz	1,63 A	0,63 A	6,25 A	4,18 A	410 V	430 V	1438 rpm
50 Hz	44 Hz	3,3 A	0,8 A	11,10 A	6,2 A	408 V	425 V	1360 rpm
Assaig 3								
49 Hz	50 Hz	0,85 A	0,62 A	2,18 A	2,54 A	410 V	445 V	1485 rpm
48 Hz	50 Hz	1,2 A	0,64 A	3,64 A	3,8 A	405 V	444 V	1470 rpm
47 Hz	50 Hz	1,48 A	0,71 A	5,12 A	5,34 A	400 V	445 V	1457 rpm
41 Hz	50 Hz	5,6 A	1,34 A	11,4 A	13,0 A	350 V	435 V	1355 rpm

Taula 4.1: Prova de funcionament del sistema

4.3 Elements externs

En aquest apartat s'explicaran les característiques dels elements externs utilitzats en aquest muntatge. Es consideren elements externs els elements la bancada de motors i l'*inverter* incorporat al sistema, ja que són els dos elements que es poden canviar per altres sense que es modifiqui necessàriament el funcionament del sistema

4.3.1 Bancada de motors

La bancada de motors utilitzada en aquest projecte està formada per dos motors d'inducció trifàsics acoblats mecànicament i col·locats en un suport.

El dos motors que formen aquesta bancada són idèntic i per tant les seves característiques són les mateixes. Es tracta de dos motors d'inducció de dos parells de pols de la marca Elektrim del model Ssg 132 M-4.

Aquests motors tenen la següent taula de característiques.

- **Potència nominal** de 10 HP que equivalen a 7,5 kW
- **Velocitat nominal** de 1450 rpm
- **Parell nominal** de 49,4 Nm
- **Rendiment** del 87% quan la càrrega és del 50%, un 87,8% quan la càrrega és del 75% i d'un 87% quan la càrrega és del 100% de la càrrega total.
- **Factor de potència** igual al 0,85
- **Corrent a la màxima càrrega** de 14,6 A treballant a 400V de tensió de línia
- **Parell de bloqueig** del rotor del 240% del parell nominal
- **Corrent de bloqueig** del rotor del 610% del corrent nominal
- **Parell màxim** del 310% del parell nominal
- **Pes** de 73 kg

El fabricant no proporciona les corbes parell-velocitat de cada model de motor, tot i això proporciona una corba parell-velocitat depenent de les característiques de cada motor. Per separar els diferents motors s'acull a la classificació proporcionada per la Associació Nacional de Fabricants Elèctrics (NEMA) dels Estats Units d'Amèrica. Aquesta associació classifica els motors en 5 classes en funció del parell de bloqueig del rotor, del parell de màxim, del corrent de bloqueig del rotor, de l'eficiència i del lliscament a la velocitat nominal. La classificació es mostra a la taula 4.2.

NEMA Design	Locked Rotor Torque	Breakdown Torque	Locked Rotor Current	% Slip	Relative Efficiency
B	70-275%*	175-300%*	600-700%	.05-5%	Medium or High
	Applications: Fans, blowers, centrifugal pumps and compressors, motor-generator sets, etc., where starting torque requirements are relatively low.				
C	200-250%*	190-225%*	600-700%	1-5%	Medium
	Applications: Conveyors, crushers, stirring machines, agitators, reciprocating pumps and compressors, etc., where starting under load is required.				
D	275%	275%	600-700%	5-8% 8-13% 15-25%	Medium
	Applications: High peak loads with or without flywheels, such as punch presses, shears, elevators, extractors, winches, hoists, oil-well pumping, and wire-drawing machines.				
E	75-190%*	160-200%*	800-1000%	0.5-3%	High
	Applications: Fans, blowers, centrifugal pumps and compressors, motor-generator sets, etc., where starting torque requirements are relatively low.				

Taula 4.2: Classificació dels motors segons NEMA

Font: Speed-Torque General Characteristics, Elektrim Motors

Tenint en compte que el parell de bloqueig del rotor dels motors utilitzats en aquest projecte és de 240%, que el parell màxim és de 310% i que el corrent màxim és de 610% es considera que els motors utilitzats són de categoria B (tot i que el parell de bloqueig sigui una mica superior, ja que segons la NEMA aquest parell pot superar una mica el límit en motors de potències baixes).

Per tant segons les corbes proporcionades pel fabricant, representades a la figura 4.18, els motors utilitzats seguirien una corba semblant a la marcada per 'Design B'

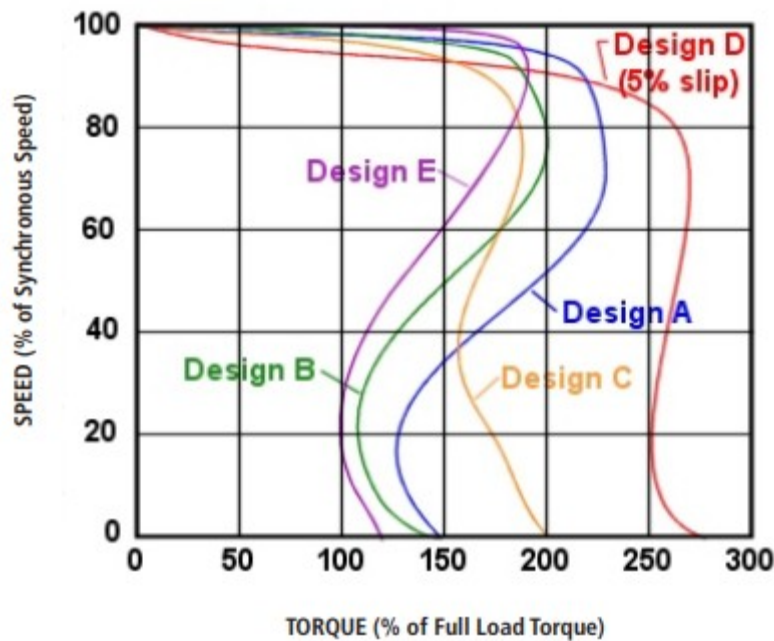


Figura 4.18: Corbes parell-velocitat en funció del tipus de motor
Font: Speed-Torque General Characteristics, Elektrim Motors

4.3.2 Inverter incorporat al sistema

Com s'ha mencionat en capítols anteriors el funcionament d'aquest sistema es basa en la utilització de dos *inverters*. Tenint en compte que un dels equips utilitzats és el que s'ha de testear, s'ha decidit col·locar l'altre *inverter* dins del muntatge, de manera que quan s'hagi de testear un equip només caldrà connectar l'equip de prova. Considerant que l'equip incorporat al muntatge ha de ser vàlid per testear *inverters* amb un rang de potències molt variat, s'ha escollit un equip amb una potència elevada de manera que permet provar equips de moltes potències diferents. Un altre criteri de selecció ha sigut que l'inverter tingui el Bus DC accessible amb facilitat, ja que és necessari connectar aquest bus al bus de l'equip de prova.

Tenint en compte les característiques necessàries s'ha escollit el model d'*inverter* 3G3RX-A4370-E1F del fabricant Omron. Aquest *inverter* té una potència màxima de 37 kW quan està alimentat a una xarxa triàstica de 400 V de tensió de línia. Un altre criteri de selecció ha sigut que l'*inverter* tingui el Bus DC accessible amb facilitat, ja que és necessari connectar aquest bus al bus de l'equip de prova.

4.3.2.1 Inverter Omron

En aquest equip es diferencien dues parts: l'etapa de potència i l'etapa de control. L'etapa de potència és la que s'encarrega de les conversions elèctriques que realitza l'equip. L'etapa de control s'encarrega de controlar els dispositius de l'etapa de control per aconseguir que l'equip realitzi les funcions fixades per l'usuari.

- Etapa de potència:

Amb l'ajuda dels documents proporcionats pel fabricant i desmuntant l'equip s'ha aconseguit obtenir l'esquema elèctric del muntatge, representat a la figura 4.19.

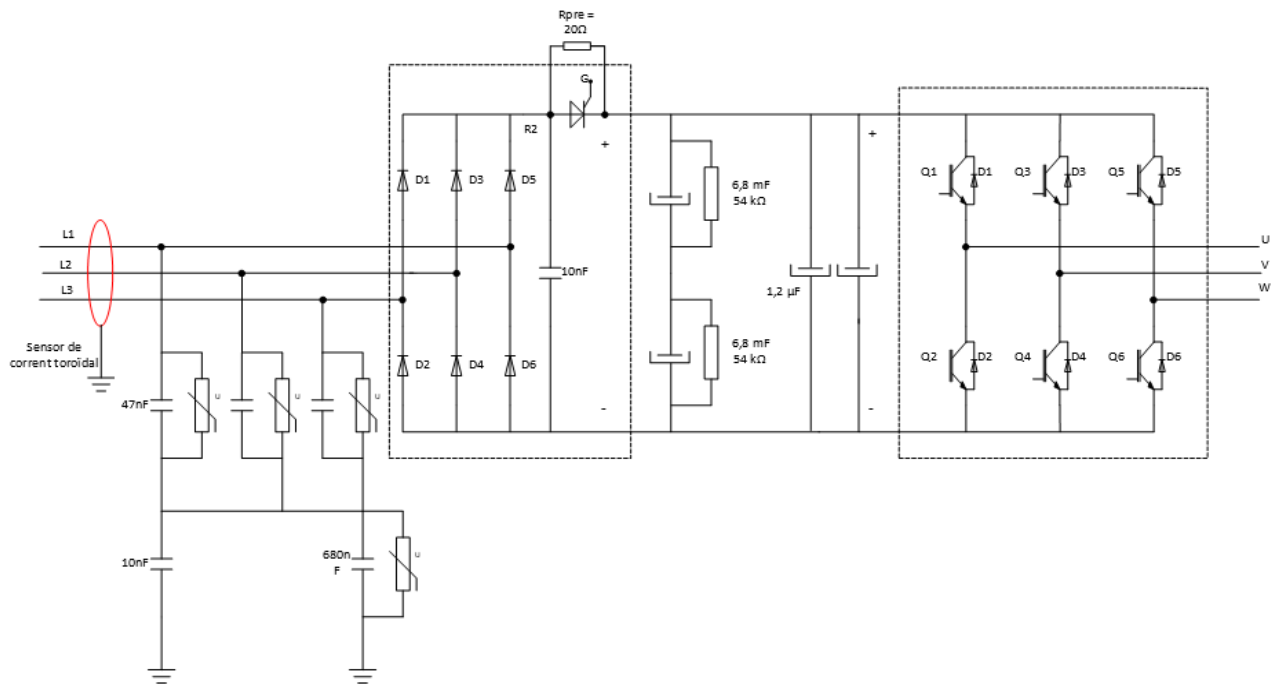


Figura 4.19: Esquema elèctric inverter Omron

Amb l'objectiu d'entendre el funcionament i les prats de l'inverter, s'explicarà dividit en 4 parts.

Protecció a l'entrada:

Com es pot observar a l'esquema aquest inverter té un sistema de protecció contra els pic de voltatge que es poden produir a la xarxa trifàsica. Per aquesta protecció s'utilitzen tres

varistors de 560 V connectats en estrella a les tres fases, de manera que si la xarxa sobrepassa la tensió permesa pel varistor començarà a conduir.

Convertidor CA/CC i precàrrega:

Per convertir el corrent altern de la xarxa en corrent continu s'utilitza un rectificador de pont complet. Aquest equip utilitza un mòdul de la marca Sanrex on s'incorpora el pont de díodes format per 6 díodes. Aquest mòdul també incorpora un tiristor que permet realitzar la precàrrega dels condensadors.

El sistema de precàrrega es completa amb una resistència de $20\ \Omega$ i 45 W de potència, de manera que al primer instant en que s'alimenta l'equip els condensadors es carreguen mitjançant la resistència que limita el seu corrent i una vegada ja estan suficientment carregats es tanca el tiristor realitzant un pont a la resistència.



Figura 4.20: Mòdul pont rectificador

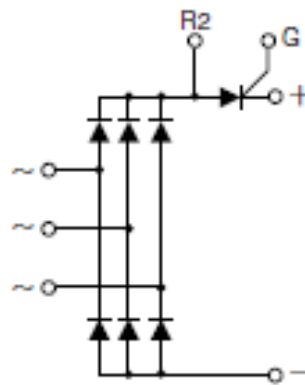


Figura 4.21: Esquema mòdul rectificador

Bus DC:

El Bus DC d'aquests equip està format per dos condensadors electrolítics de 6,8 mF de capacitat col·locats en sèrie entre el positiu i el negatiu del bus. També disposa de condensadors de $1,2\mu\text{F}$ col·locats en paral·lel entre els dos pols del bus que ajuden a reduir components d'alta freqüència.

Convertidor CC/CA:

Per convertir el corrent continu del Bus DC a una ona trifàsica que s'envia al motor s'utilitza un convertidor inversor mitjançant semiconductors IGBT. En aquest equip, igual que en el pont rectificador, s'ha utilitzat un mòdul de la marca Mitsubishi que incorpora els 6 IGBTs que formen l'inversor.



Figura 4.22: Mòdul d'inversor

- Etapa de control:

L'etapa de control d'un *inverter* és la que s'ocupa de controlar el funcionament dels elements de l'etapa de potència. Aquesta etapa generalment està alimentada per una font d'alimentació de corrent continu. L'alimentació del control d'aquest equip és de +24 V. El control d'aquest equip es realitza a una placa aïllada de l'etapa de potència per evitar que els sorolls perjudiquin el funcionament. El control principal de l'equip es realitza mitjançant la programació d'un microcontrolador de la marca Hitachi que executa les ordres.

El control de la velocitat d'aquest equip es pot programar mitjançant un ordinador connectat a través d'una connexió RS485 o mitjançant un display incorporat en el propi equip. En aquest projecte es controlarà mitjançant el display, ja que és la forma més senzilla de controlar l'equip i proporciona les mateixes possibilitats de control. El funcionament i control d'aquest display s'explica al manual de funcionament de l'annex 1.



Figura 4.23: LCD display inverter Omron

- Dimensions i distribució dels elements a l'inverter:

Observant els fulls de característiques proporcionat pel fabricant s'obté que les dimensions d'aquest equip són les següents:

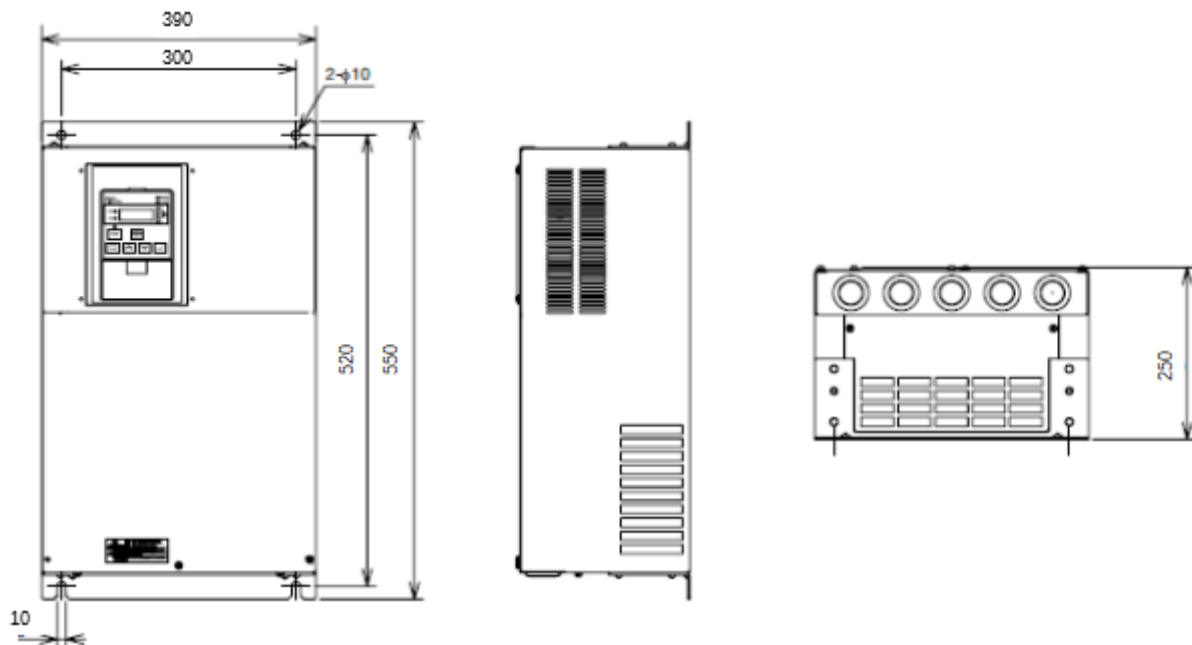


Figura 4.24: Dimensions *inverter* Omron
Font: Manual d'usuari Omron 3G3RX-A4370

Els elements principals de la part exterior a tindre en compte són el display LCD, els ventiladors de refrigeració, els orificis de col·locació de l'equip i les connexions. Aquest elements estan distribuïts de la següent forma observant l'equip des de la part frontal.

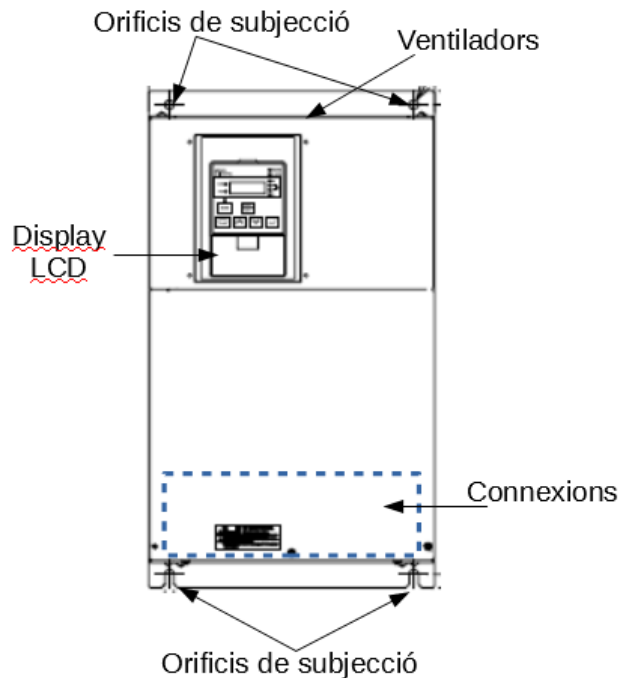


Figura 4.25: Distribució dels elements exteriors

Font: Manual d'usuari Omron 3G3RX-A4370

Connexions *inverter*:

Aquest inverter té una sèrie de connexions en l'etapa de potència i en l'etapa de control. En aquest projecte les connexions que s'utilitzen per modificar l'etapa de control no s'utilitzen, ja que la programació de l'equip es realitza a través de el display LCD.

En canvi les connexions que si que s'utilitzen són les connexions de l'etapa de potència, ja que és on es connecta la xarxa d'entrada, el Bus DC i l'alimentació del motor.

La figura 4.26 és una imatge dels de les connexions de l'etapa de potencia i de l'etapa de control de l'equip.

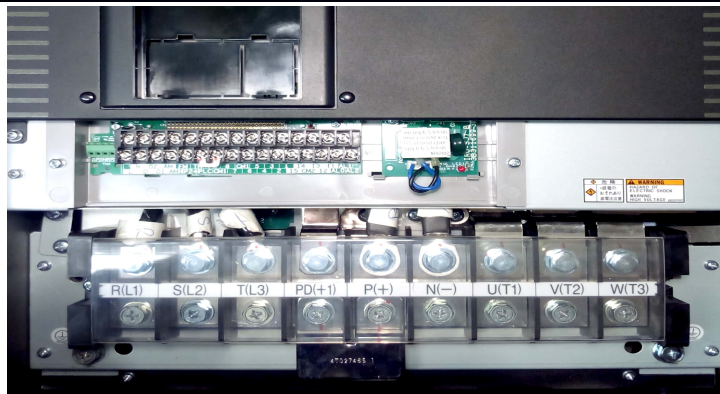


Figura 4.26: Connexions *inverter* Omron

Com es pot observar a a imatge tant les connexions de l'etapa de control com les connexions de l'etapa de potència es realitzen mitjançant cargols. Els terminals necessaris per connectar a l'etapa de potència són terminals rodons amb un forat de mètrica 8 grimpats als cables de connexió.

Com es pot observar a la figura, el fabricant proporciona un plàstic d'aïllament que proporciona seguretat a l'usuari.

Les connexions de l'etapa de potència es distribueixen de la següent forma.

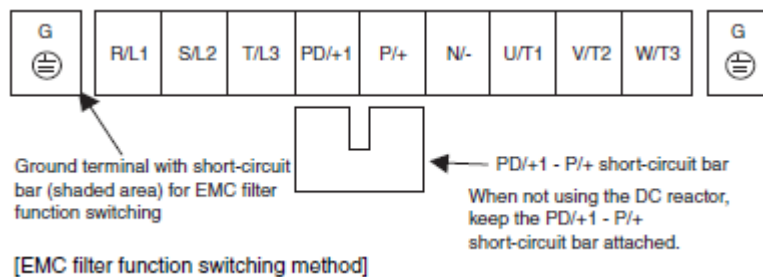


Figura 4.27: Distribució de les connexions de potència

Font: Manual d'usuari Omron 3G3RX-A4370

On els connectors G corresponen al punt de terra de l'equip, els connectors R/L1, R/L2, R/L3 són els connectors on es col·loca la xarxa trifàsica, els connectors P/+ i N/- corresponen al pol positiu i negatiu del Bus DC respectivament i els connector U/T1, V/T2 i W/T3 corresponen als connectors de sortida de l'equip.

Com s'observa a la figura 4.27 es col·loca un pont entre el connector PD/+1 i el connector P/+, ja que en la utilització que es realitzarà d'aquest equip no s'usarà el reactor de corrent continu que serveix per allisar el pols de corrent consumits de la xarxa elèctrica.

- Ventilació i refrigeració:

Per evitar que la temperatura de l'equip augmenti durant el funcionament, aquest *inverter* està dotat de dos ventiladors que generen un flux d'aire dins de l'equip que ajuda a refrigerar els components. El sistema de ventilació està dissenyat de manera que els ventiladors succionen aire de l'interior cap a l'exterior. Amb aquest sistema s'aconsegueix que l'aire fred provinent de l'exterior circuli per dins de l'equip i surti pels ventiladors. Aquests ventiladors estan alimentats a 24 V de tensió continua i controlats per la placa de control.



Figura 4.28: Disposició dels ventiladors a l'equip

4.4 Disseny del muntatge

Una vegada es disposa de l'*inverter* i de la bancada de motors que s'utilitzarà, s'ha dissenyat el muntatge que s'ha dividit en dos parts: disseny elèctric i disseny mecànic.

En el disseny elèctric s'ha estudiat quins components són els necessaris per a que el muntatge es comporti de la forma desitjada oferint les proteccions necessàries per evitar que l'usuari pugui prendre mal.

Una vegada es disposa del disseny elèctric s'ha dissenyat el muntatge mecànic que permet distribuir els elements utilitzats de la forma més còmode per l'usuari.

4.4.1 Disseny Elèctric

4.4.1.1 Interruptors i proteccions

Una vegada comprovat que el sistema ha funcionat correctament i que l'objectiu principal del projecte es compleix s'ha realitzat el disseny del sistema complet amb un muntatge més segur i més compacte que el muntatge on s'han realitzat les proves. L'objectiu d'aquest disseny és realitzar un sistema fàcil d'utilitzar i que disposi de les proteccions elèctriques necessàries complint els protocols de seguretat.

El disseny d'aquest muntatge s'ha dividit en dues parts, l'etapa de potència i l'etapa de control.

En la part de potència s'ha estudiat quins són els sistemes de connexió més adequats per evitar el mal funcionament del sistema.

Per a realitzar la part de control s'ha dissenyat un sistema que permet un fàcil funcionament de l'aparell i sobretot que disposi de les proteccions de seguretat per evitar que un mal funcionament del sistema pugui produir danys al personal que l'utilitza.*

* S'ha realitzat una recopilació dels fulls de característiques dels components utilitzats, però no s'ha inclòs als annexos, ja que en els següents apartats s'especifiquen les característiques principals i s'ha considerat que incloure'ls seria un excés d'informació.

Etapla de potència:

Per al disseny de l'etapa de potència s'ha considerat els possibles errors de funcionament que es poden produir en el sistema i s'ha estudiat quines solucions es poden aplicar per evitar que un d'aquest errors produeixi un mal funcionament. Finalment s'ha realitzat el següent esquema conceptual que permet entendre com s'ha decidit solucionar cada possible error. A l'annex 2 es mostren els esquemes elèctrics definitius.

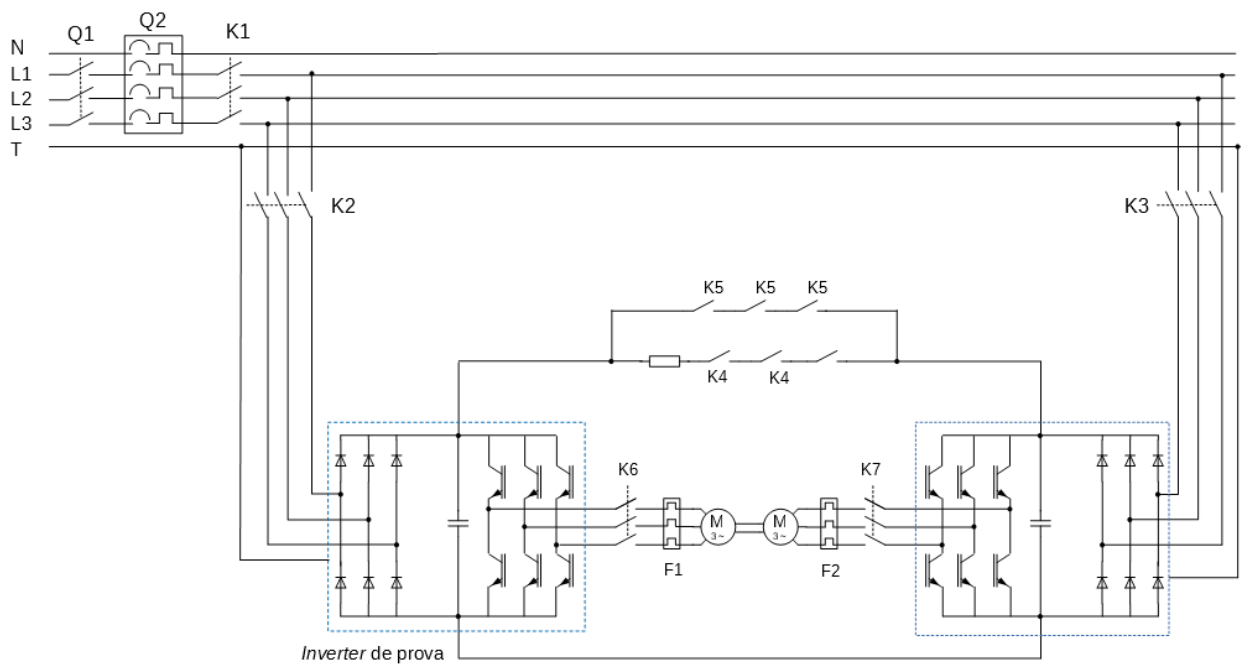


Figura 4.29: Esquema blocs del muntatge etapa potència

Per justificar perquè s'ha seleccionat els diferents components del disseny d'aquest esquema, s'ha dividit en les següents parts que permeten explicar d'una forma més clara la utilitat dels elements.

Alimentació del sistema:

Per controlar l'alimentació del sistema s'ha decidit col·locar l'interruptor Q1 que permet activar i desactivar manualment l'alimentació de tot el sistema.

Aquest interruptor està situat a l'entrada del sistema de manera que fins que no s'accióni no hi haurà alimentació a cap equip o component. Per realitzar aquesta funció s'ha escollit un interruptor trifàsic giratori de dos posicions, ON i OFF, que permet obrir o tancar les tres fases d'alimentació del sistema.

Considerant que els motors utilitzats tenen un corrent màxim de 15,4 A, s'ha considerat que el corrent màxim que pot consumir el sistema és de 20 A. Per aquest motiu s'ha seleccionat l'interruptor amb número de fabricant VCD01 de la marca Schneider Electric.



Figura 4.30: Interruptor principal

Protecció de sobre corrents al sistema:

El disseny d'aquest muntatge s'ha realitzat per reduir el consum de corrent provinent de la xarxa elèctrica, de manera que si en algun instant el corrent consumit pel sistema creixés fins a nivells excessivament elevades significaria que el sistema no està funcionant correctament o se n'està fent un mal ús. Si es produís aquest fenomen podria provocar danys als equips que componen el sistema. Per evitar-ho s'ha col·locat un interruptor magnetotèrmic després del interruptor Q1, de manera que si el corrent que circula per la xarxa supera els nivell de corrent màxim que permet l'interruptor magnetotèrmic aquest s'obrirà i es deixarà d'alimentar el sistema sencer.

Considerant que quan el sistema està funcionant correctament el flux d'energia circula entre els dos *inverters*, el corrent que consumeix el sistema només correspon a les pèrdues

d'energia que s'han produït durant el funcionament. Tenint en compte que el consum energètic no ha de ser elevat s'ha seleccionat un interruptor magnetotèrmic amb un corrent màxima de 20 A. Aquest valor s'ha obtingut realitzant una aproximació del corrent màxim que pot consumir cada motor treballant a plena càrrega i sumant les pèrdues que s'han obtingut en les proves inicials.

En aquest projecte s'ha seleccionat un interruptor magnetotèrmic de 4 pols, ja que d'aquesta manera l'interruptor s'obrirà tant si circula un corrent elevat per alguna de les fases com si ho fa pel neutre.

Tenint en compte les característiques necessàries s'ha decidit col·locar l'interruptor automàtic magnetotèrmic de la marca Schneider Electric amb número de fabricant A9F79420.



Figura 4.31: Interruptor automàtic magnetotèrmic

Accionament del sistema:

Realitzant aquest disseny s'ha considerat que és important poder controlar si el sistema està alimentat per obtenir un millor control del seu funcionament. Per això s'ha decidit col·locar el contactor K1 a l'entrada trifàsica del sistema.

En aquest cas s'ha seleccionat un contactor trifàsic, que permet obrir i tancar les tres fases d'alimentació del circuit. Aquest contactor també és una protecció per al consum que té el sistema, ja que un consum molt elevat de corrent equival a un mal funcionament del muntatge.

A causa de que l'interruptor magnetotèrmic que s'ha col·locat a l'entrada té un corrent màxim de 20 A, també s'ha seleccionat un contactor trifàsic amb el mateix corrent màxim.

Per tant si el corrent que circula per les fases d'entrada supera els 20 A el contactor obrirà el circuit i es deixarà d'alimentar el sistema. D'aquesta manera s'obté una protecció per si el sistema té un consum elevat degut a algun error de funcionament.

Per escollir quin contactor és el més adequat s'ha realitzat un estudi dels diferents models que proporcionen els fabricants considerant les especificacions, la qualitat i el preu. Aquest estudi ha portat a la conclusió que el model que més s'ajusta a les característiques que es necessiten en aquest treball és el model LC1D18P7 del fabricant Schneider Electric. Aquest contactor té les següents característiques i imatge.

Número de pols	3P NO
Tensió màxima	690 V AC 25...400 Hz
Corrent nominal	18 A
Contactes auxiliars	1 NO + 1 NC
Tensió circuit de control	230 V AC 50/60Hz
Temperatura de funcionament	- 5...60°C

Taula 4.3: Característiques contactor 18 A



Figura 4.32: Imatge contactor 18 A

Protecció a l'entrada dels *inverters*:

Per controlar l'alimentació dels dos *inverters* i afegir una protecció contra possibles corrents elevades, s'ha decidit col·locar dos contactors, K2 i K3, a l'entrada de cadascun dels equips.

En aquest cas, igual que en el contactor K1, s'ha seleccionat uns contactors trifàsics que permeten obrir o tancar les fases d'alimentació dels *inverters*. D'aquesta manera es pot controlar quan s'alimenten o es desconnecten els equips manualment.

Aquestes contactors també ens permeten protegir els *inverters* de corrents elevades, ja que en cas que es superi la corrent màxima que permet el contactor, aquest s'obrirà i deixarà d'arribar corrent als equips.

Un corrent elevat a l'entrada de l'*inverter* es pot produir per culpa d'un mal funcionament del propi *inverter* o per un mal funcionament del sistema que produeixi que l'equip necessiti una potència d'entrada elevada. En el cas de l'*inverter* que s'està testejant, com que no es pot garantir que l'equip funciona correctament, aquest contactor situat a l'entrada també permet protegir el sistema dels errors que es poden produir dins d'aquest equip. De manera que en cas que es produís un curtcircuit en l'equip evitaria que aquest sobre pic del corrent es propagués pel sistema i fes malbé el muntatge.

A causa de que el contactor K1 que s'ha col·locat a l'entrada del sistema té una corrent màxima de 18 A i a que els motors tenen una corrent màxima de 15,4 A, s'ha decidit que els contactors K2 i K3 també tinguin una corrent màxima de 18 A.

Per això s'ha escollit el mateix contactor trifàsic que en el cas del contactor K1, amb les característiques mencionades anteriorment.

Protecció i control del bus DC:

Per connectar els Busos DC dels *inverters*, s'ha decidit col·locar dos contactors, K4 i K5, que permeten controlar aquesta connexió.

En termes teòrics, la tensió als Busos DC dels dos *inverters* hauria de ser la mateixa, ja que aquests equips utilitzen un rectificador de pont complet per convertir el corrent altern de l'entrada en corrent continu. Tot i això a la pràctica, els diferents models d'*inverters* disposen d'un Bus DC format per condensadors de diferents capacitats. Depenent de la capacitat dels condensadors els transitoris de càrrega i descàrrega són diferents i això produeix que la tensió al Bus DC dels *inverters* tingui un cert rissat que produeix que en certs instants la tensió no sigui igual pels dos equips.

En el sistema es connecten els dos Busos DC dels dos *inverters* per permetre que l'energia flueixi d'un equip a l'altre. Si es connectessin directament els dos busos amb valors de tensions diferents es produiria un pic de corrent molt elevat, ja que estaríem unint dos punts amb tensions diferents. Per disminuir la intensitat d'aquest pic i evitar que sigui perjudicial pels equips, s'ha dissenyat un sistema de connexió en dos etapes:

- La primera etapa consisteix en connectar, mitjançant el contactor K4, una resistència entre els dos busos de manera que actuï com una resistència de precàrrega. D'aquesta manera al tancar el contactor el corrent que circularà entre els dos busos quedarà limitat pel corrent que pot circular per la resistència. Ja que la diferencia de tensió màxima entre els busos és de valors al voltant del 5 V, s'ha decidit col·locar una resistència amb valor òhmic baix.

- Un vegada la diferència de tensió entre els busos sigui menyspreable, es tanca el contactor K5 que fa un pont amb la resistència i connecta els busos directament.

Al tractar-se d'un circuit de corrent continu amb tensions elevades, si es tanqués el circuit directament mitjançant un interruptor simple es produiria una sobre pic que generaria un arc elèctric dins l'interruptor que podria danyar-lo. Per disminuir l'efecte d'aquest arc s'utilitza un contactor trifàsic amb els contactes connectats en sèrie, d'aquesta manera al haver tres contactes que s'obren o es tanquen simultàniament la tensió es reparteix pels tres contactes. D'aquesta manera cada arc té menys tensió i per tant es menys perjudicial .

En aquest cas com la intensitat que circula per els busos de continua no arriba a nivells elevats, s'ha decidit col·locar uns contactors trifàsics de 12 A, considerant que la intensitat no hauria de superar aquest valor i en el cas que el superés el contactor s'obriria i els busos deixarien d'estar connectats.

Tenint en compte les característiques necessàries s'ha seleccionat el contactor LC1D12P7 de la marca Schneider Electric que té les característiques i imatge següents.

Número de pols	3P NO
Tensió màxima	690 V AC 25...400 Hz
Corrent nominal	12 A
Contactes auxiliars	1 NO + 1 NC
Tensió circuit de control	230 V AC 50/60Hz
Temperatura de funcionament	- 5...60°C



Taula 4.4: Característiques contactor 12 A

Figura 4.33: Imatge contactor 18 A

Protecció i control dels motors:

Al disposar d'una bancada de dos motors d'inducció acoblats mecànicament, és important tenir un control de quan els motors estan connectats als *inverters*. Aquest control és important perquè, per exemple, si un dels *inverters* fa girar el seu motor sense que l'altre motor estigui alimentat, aquest segon motor estarà treballant com a generador. D'aquesta manera, si el motor està connectat al *inverter* generarà un flux d'energia en direcció al *inverter* que podria produir una pujada no desitjada de la tensió al seu Bus DC.

Per tindre aquest control que ens permeti fer funcionar el sistema de la manera més adequada s'han col·locat els contactors trifàsics K5 i K6 entre els *inverters* i els motors. A causa de que els motors tenen una corrent màxima de 15,4 A, s'ha seleccionat contactors que permetin circular corrents fins a 18 A, ja que d'aquesta manera no es limita el funcionament del motor.

Amb el disseny del sistema que s'ha realitzat els problemes amb més risc de fer malbé l'equip, provenen dels motors, ja que un mal ús dels motors pots generar un consum energètic molt elevat que pot ser perjudicial per l'*inverter* que té connectat, d'aquesta manera amb aquests contactors i fent un bon ús del sistema es poden evitar certs problemes.

En aquests cas s'ha seleccionat el mateix contactor trifàsic utilitzat en el contactor K1, K2 i K3.

Els motors d'inducció estan formats per una sèrie de bobinats que generen un camp magnètic. El corrent màxim que pot circular per un motor està limitat per el corrent que pot circular per aquest bobinat. Els motors que s'utilitzen en aquest sistema tenen un corrent màxim de 15,4 A, per tant fer-los funcionar a corrents superiors els podria fer malbé.

Per evitar que la corrent que s'envia al motor sigui superior al corrent màxim fixat s'ha col·locat un relé de sobrecorrent. Aquest relé té la característica que si el corrent que circula per ell és superior al que s'ha fixat prèviament, obre el circuit. D'aquesta manera fixant la corrent màxima que pot circular pel relé a 15,4 A s'aconsegueix que el corrent que circula pels motors no superi aquesta xifra.

En aquest sistema s'ha seleccionat un relé de sobrecàrrega tèrmica diferencial amb número de fabricant LRD21 de la marca Schneider Electric, que es connecta directament al contactor K6 i K7, facilitant la compatibilitat dels dispositius. Aquest relé té les característiques i imatge següents.

Rang ajustable de protecció tèrmica	12...18 A
Número de pols	3P NO
Tensió nominal d'aïllament	600 V AC
Freqüència màxima	400 Hz
Resistència a pics de tensió	6 Kv

Taula 4: Característiques relé tèrmic



Figura 4.34: Imatge relé tèrmic

Etapa de control:

Per controlar l'etapa de potència mencionada anteriorment s'ha realitzat un esquema que permet veure quins components s'han utilitzat i quina es la seva funcionalitat.

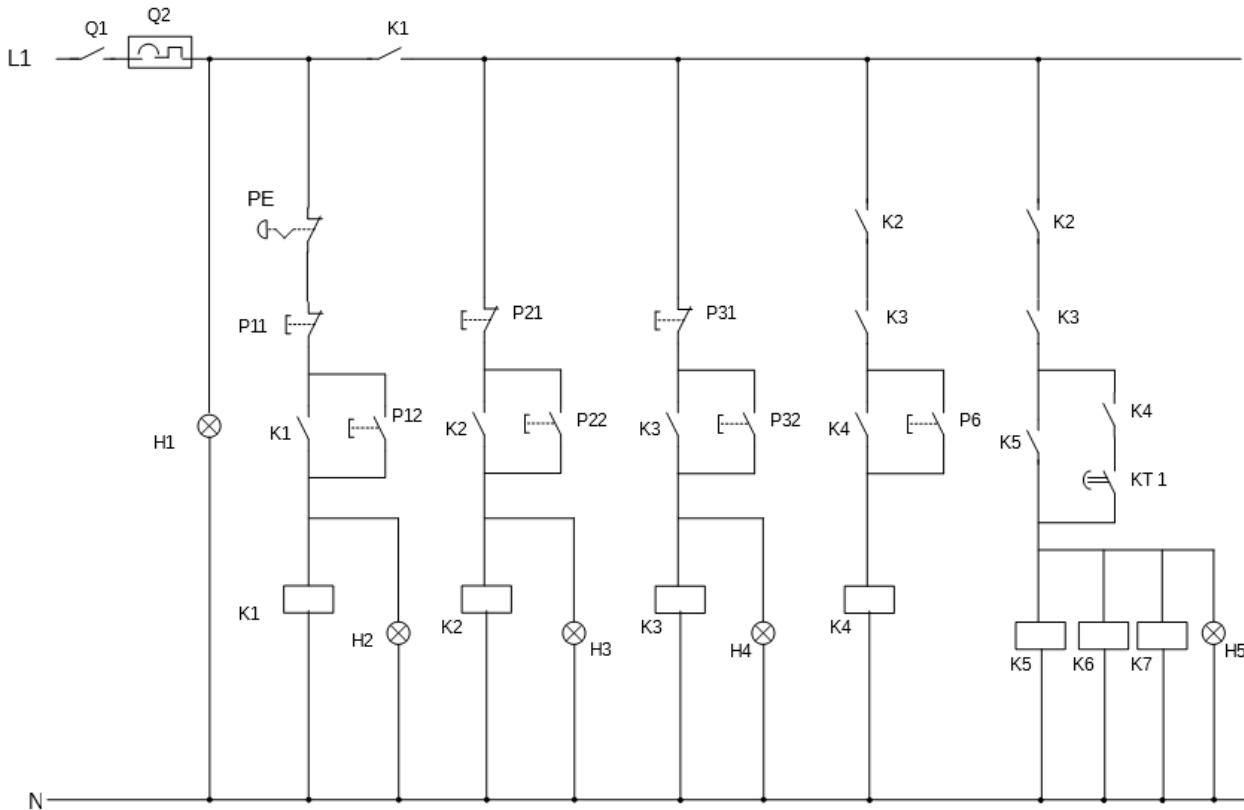


Figura 4.35: Esquema de control

En aquest esquema podem veure l'activació dels diferents contactors explicats en l'apartat anterior.

Per a realitzar el control dels contactors s'ha utilitzat la tensió entre una de les fases d'entrada L1 i el neutre.

A continuació es justifica perquè s'ha col·locat cada element separant-ho en diferents blocs:

Alimentació de l'etapa de control

La fase d'alimentació del sistema de control s'ha col·locat després de l'actuació de l'interruptor Q1 i del interruptor magnetotèrmic Q2. D'aquesta manera el sistema de control només estarà activat si s'ha tancat manualment l'interruptor Q1. L'interruptor magnetotèrmic serveix per protegir el sistema en cas de que hi hagues un sobre pic del corrent.

Quan l'interruptor Q1 es tanqui, s'alimentarà el pilot H1 que permet informar de manera visual al usuari de que el sistema està alimentat i d'aquesta manera evitar que es faci un mal ús del sistema quan hi estan circulant tensions elevades. El pilot seleccionat és un pilot de color taronja amb diàmetre de 22 mm, de la marca Schneider Electric. Aquest fabricant proporciona aquest pilot en dos parts que s'acoblen, el cos i el capçal. El número de fabricant del cos és ZB4BVM5 i el del capçal és ZB4BV053.

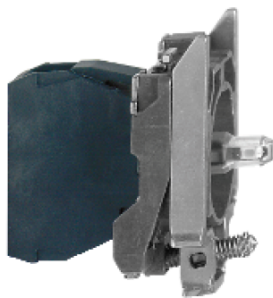


Figura 4.36: Cos pilot groc



Figura 4.37: Capçal pilot groc

Control del contactor K1:

El contactor K1 és el dispositiu que controla l'alimentació de tot el sistema, per tant si els contactes d'aquest contactor estan oberts cap element del circuit estarà alimentat. Aquest contactor es controla mitjançant un sistema d'arrancada-aturada.

Aquest sistema està format per tres interruptors: dos polsadors amb retorn automàtic i un contacte auxiliar del contactor K1. En aquest muntatge s'ha utilitzat un polsador amb retorn automàtic normalment tancat P11 i un polsador amb retorn automàtic normalment obert P12.

El funcionament d'un sistema d'arrancada-aturada consisteix en que al prémer el polsador P12 s'alimenta la bobina que tanca els contactes del contactor de manera que es tanca el contacte auxiliar K1. Quan el contacte auxiliar està tancat la bobina del contactor s'alimenta a través d'aquest contacte i per tant es pot deixar de prémer el polsador P12. Per obrir els contactes del contactor només cal prémer el polsador P11, ja que al polsar-lo s'obrirà l'alimentació de la bobina i per tant s'obrirà el contacte auxiliar. Per tornar a posar en marxa el sistema només caldrà tornar a polsar el polsador P12.

Per aconseguir aquest sistema d'arrancada-aturada s'ha utilitzat dos pulsadors amb retorn automàtic de 22 mm de diàmetre de la marca Schneider Electric. Aquests pulsadors estan formats per dos parts: el cos del pulsador i el capçal.

En el cas del pulsador normalment obert, P12, s'ha escollit el format pel un cos del model ZB4BZ101 i un capçal del model ZB4BA3.



Figura 4.38: Cos pulsador NO



Figura 4.39: Capçal pulsador NO

En el cas del pulsador normalment tancat, P11, s'ha escollit el format pel un cos del model ZB4BZ102 i un capçal del model ZB4BI4. En aquest cas el capçal és de color vermell i el posador sobreesurt, de manera que es facilita la desconexió del sistema amb més facilitat en cas d'urgència.



Figura 4.40: Cos pulsador NC



Figura 4.41 Capçal pulsador NC

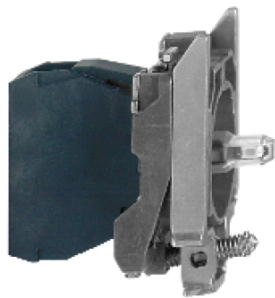
El circuit d'alimentació de la bobina d'aquest contactor també disposa d'un interruptor de parada d'emergència, que té una funcionalitat semblant a la del pulsador P11. Però en el seu cas aquest botó d'emergència està dissenyat de manera que té unes dimensions més grans que les dels altres elements. Aquestes dimensions estan dissenyades per facilitar la visualització del element de manera que si l'usuari necessita pulsar-lo ja que s'ha produït una emergència l'accés sigui ràpid i fàcil. Aquest botó d'emergència és de desactivació manual de forma que si algun usuari el polsa el sistema es mantindrà desactivat fins que l'usuari el desactivi manualment, d'aquesta manera s'evita que l'equip es torni a posar en marxa sense el permís del usuari.

Per aquesta funció s'ha seleccionat un botó d'emergència del fabricant Schneider Electric. Aquest boto està format per un cos de pulsador normalment tancat i un capçal. El cos escollit és el model ZB4BZ102, el mateix utilitzat en el pulsador P11. El capçal seleccionat és el model ZB4BS844, aquest capçal és de 40 mm de diàmetre i sobresurt 39,5 mm del panell on es col·loca.



Figura 4.42: Capçal pulsador d'emergència

Per informar l'usuari de que el contactor K1 està tancat i que per tant el sistema està alimentat s'ha col·locat el pilot H2 de color verd, en paral·lel a la bobina del contactor. D'aquesta manera quan la bobina del contactor estigui alimentada també ho està el pilot lluminós. S'ha seleccionat un pilot de color verd de 22 mm de diàmetre que està format per dues parts: un cos i un capçal. El cos escollit és el model ZB4BVM3 i el capçal és el model ZB4BV033.

**Figura 4.43:** Cos pilot verd**Figura 4.44:** Capçal pilot verd

Per assegurar-se que l'alimentació dels *inverters* no es pot realitzar fins que s'hagi tancat manualment el contactor K1, s'ha col·locat un altre contacte auxiliar en sèrie a l'alimentació, de forma que fins que aquest contacte auxiliar no s'hagi tancat no es podrà activar cap altre element. Per realitzar aquesta operació es necessita un contacte normalment obert, a causa de que el contacte auxiliar normalment obert que ve incorporat en el contactor ja s'està utilitzant en la maniobra d'arracada-aturada ha sigut necessari col·locar un bloc de contactes auxiliars. En aquest cas s'ha seleccionat un bloc de contactes auxiliars de la marca Schneider Electric que està dissenyat per col·locar-se a sobre del contactor de manera que quan el contactor canviï d'estat també ho farà el bloc de contactes auxiliar.

El bloc de contactes auxiliars seleccionat és el model LADN40 que està format per quatre contactes auxiliars, tots ells normalment oberts.

**Figura 4.45:** Bloc de contactes auxiliars

Control contactors K2 i K3:

Els contactors K2 i K3 són els contactors que alimenten els *inverters*. En aquest cas s'ha escollit uns contactors trifàsics amb una bobina alimentada entre la fase L1 i el neutre.

Per controlar l'alimentació de la bobina s'ha col·locat tres interruptors que permeten al usuari controlar fàcilment l'activació.

Per activar i desactivar aquest contactor s'ha utilitzat el mètode d'arrancada-aturada que s'ha explicat anteriorment. En el cas de l'*inverter* de prova el polsador normalment oberts que permet l'activació de l'equip, és el P22 i el polsador normalment tancat que permet la desactivació de l'equip és el polsador P21.

En el cas de l'*inverter* incorporat en el sistema el polsadors normalment oberts que permet l'activació de l'equip, és el P32 i el polsador normalment tancat que permet la desactivació de l'equip és el polsador P31.

Els polsadors són els mateixos que s'han utilitzat per el sistema d'arrancada-aturada del contactor K1, de la marca Schneider Electric.

Perquè l'usuari visualitzi si els *inverters* estan alimentats s'han connectat els pilots lluminosos H3 i H4 en paral·lel a la bobina dels contactors K2 i K3, de manera que quan s'alimenta aquesta bobina també ho fan els pilots. S'ha seleccionat els mateixos pilots de color verd que s'ha utilitzat en el pilot H2.

Control de la connexió dels busos:

Per controlar quan es connecten els busos de continua dels dos *inverters*, que permeten que la l'energia circuli entre els dos equips i d'aquesta manera aconseguir un estalvi energètic, s'ha dissenyat un sistema que controla l'activació dels contactors K4 i K5.

Com s'ha explicat en l'etapa de potència la connexió dels busos ha de seguir un procediment de tancament dels contactors K4 i K5. Aquest procediment consisteix en tancar primer el contactor K4 per connectar la resistència i equilibrar les tensions, un cop les tensions estiguin equilibrades es tanca el contactor K5 que connectarà directament els busos. Perquè aquest procediment sigui més automatitzat i l'usuari no hagi d'estar pendent de si els busos estan equilibrats per tancar el contactor K5 s'ha realitzat un sistema en que l'usuari tanca manualment el contactor K4 i quan les tensions estan equilibrades el sistema tanca automàticament el contactor K5. Per aconseguir aquest objectiu s'ha dissenyat un sistema en que l'usuari disposa d'un polsador que li permet tancar manualment el contactor K4. Mitjançant el contacte auxiliar normalment obert que disposa el propi contactor K4 s'alimenta

l'interruptor temporitzador KT1 que comença la compta enrere del temps prefixat. Quan ha transcorregut aquest temps l'interruptor temporitzador es tanca alimentant la bobina del contactor K5 de manera que connecta directament els busos. Ja que els *inverters* que es proven no tenen els bussos de continua amb condensadors de la mateixa capacitat no es pot calcular exactament quan estaran els busos equilibrats, per evitar que es connectin els busos massa d'hora s'ha estimat que el temps màxim necessari per estabilitzar els busos és de 5 segons, per tant aquest és el temps que s'ha establert per la connexió de l'interruptor temporitzador.

Per realitzar aquesta funció s'ha seleccionat un temporitzador del model RE22R1MAMR del fabricant Schneider Electric. Aquest temporitzador permet retardar el temps de connexió fins a 30 h, i proporciona un corrent nominal a la sortida de 8A que ja són suficients per activar la bobina del contactor.



Figura 4.46: Interruptor temporitzat

Per informar visualment de que els busos dels dos *inverters* estan connectats, s'ha col·locat el pilot lluminós H5 en paral·lel a la bobina del contactor K5. Per tant quan s'alimenti la bobina del contactor també s'alimentarà el pilot lluminós. S'ha escollit el mateix pilot lluminós de color ver de la marca Schneider Electric que s'ha utilitzat en els pilots H2, H3 i H4.

Per fer aquest disseny s'ha considerat els possibles problemes que pot comportar un mal funcionament de la connexió dels busos. El problema principal que s'ha de suplir és el fet de que quan els motors estan girant amb consignes de velocitats diferents, un està treballant com a motor i l'altre està treballant com a generador. L'*inverter* que rep l'energia del motor que treballa com a generador tendeix a incrementar la tensió en el seu bus de contínua, per tant si els busos no estan connectats la tensió al bus DC de l'*inverter* pot arribar fins a nivells que poden ser perjudicials per l'equip. Per evitar que això succeeixi s'ha d'evitar que els motors

estiguin en funcionament si els busos no estan connectats. Per aconseguir-ho s'han pres les següents mesures de seguretat.

- Per evitar que es pugui desconectar els busos mentre els motors estan en funcionament s'ha decidit no col·locar cap interruptor que permeti obrir els busos un cop s'han tancat. D'aquesta manera els busos es desconectaran quan el sistema s'apagui mitjançant el contactor K1 o l'interruptor principal Q1, ja que s'ha considerat que en cap moment del funcionament normal del sistema és necessari obrir els busos.
- Per assegurar que no es posarà en marxa els motors abans d'haver connectat els busos s'han col·locat les bobines dels contactors K6 i K7, que són els contactors que permeten connectar els motors als *inverters*, en paral·lel amb la bobina del contactor K5. D'aquesta manera fins que no s'alimenti la bobina del contactor K5, connectant els busos, no podrà arribar cap alimentació als motors.
- Si es connecten els busos dels *inverters* quan només un dels equips està en funcionament, s'estaria connectant els condensadors dels dos busos en paral·lel. Això produiria que els dos busos es carreguessin alhora amb l'energia provinent de l'equip que està connectat. El problema estaria en que si els condensadors dels equips tenen capacitats diferents es podria provocar un curtcircuit que generaria un pic de corrent molt elevat que podria danyar el sistema. Per evitar-ho s'ha utilitzat els contactes auxiliars normalment oberts dels contactors K2 i K3. Aquests contactes auxiliars s'han col·locat en sèrie als circuits de control dels contactors que controlen el tancament dels busos, de manera que fins que els dos equips no estiguin alimentats no es podran alimentar les bobines dels contactors K4 i K5.

El contacte auxiliar normalment obert dels contactors K2 i K3 s'utilitza en el sistema d'arrancada-aturada dels propis contactors. Per això, igual que en el contactor K1 s'ha hagut de col·locar un bloc de contactes auxiliars que permet controlar el tancament dels busos.

El bloc de contactes auxiliars utilitzat és el mateix que s'ha utilitzat en el contactor K1 de la marca Schneider Electric. Aquest bloc de contactes permet obtenir 4 contactes normalment oberts addicionals.

4.4.1.2 Equips de mesura

Per obtenir un millor control del què està succeint en tot moment en el sistema s'ha decidit col·locar una sèrie d'equips de mesura.

En aquest projecte s'ha escollit equips de mesura analògics, ja que s'ha considerat que representen d'una forma més visual els paràmetres que s'han de valorar. Tot i que els equips de mesura digitals ofereixen una millor precisió dels valors mesurats, s'ha utilitzat equips analògics, ja que les mesures a prendre en aquest sistema són de nivells elevats i la precisió no és un factor determinant. En canvi s'ha considerat que la característica més important dels equips de mesura analògics és la fàcil i ràpida capacitat de visualització dels increments o decrements de les mesures que permet comprovar ràpidament si el sistema és estable i si està funcionant correctament.

Introducció als equips de mesura analògics:

Els equips de mesura analògic es basen en el funcionament del galvanòmetre, un transductor analògic electromagnètic que varia la posició d'una agulla en funció del corrent elèctric que circula a través d'una bobina.

Els equips de mesura analògic es divideixen en dos grups:

- Equips de mesura d'imant mòbil: aquests equips de mesura poden mesurar voltatges i intensitats tant en corrent continu o corrent altern.
- Equips de mesura de bobina mòbil: aquests equips de mesura serveixen per mesurar voltatges i intensitats de corrent continu.

En aquest projecte només s'utilitzen equips de mesura d'imant mòbil, ja que les mesures que s'han d'obtenir són de corrent altern.

Funcionament dels equips de mesura d'imant mòbil:

Els equips de mesura d'imant mòbil estan formats per una bobina, per on circula el corrent que es vol mesurar, un imant situat a l'interior d'aquesta bobina i una agulla associada al imant. El principi de funcionament d'aquest equips es basa en que quan es fa circular un corrent per la bobina, aquesta genera un camp magnètic proporcional al seu interior que comporta una força de repulsió sobre l'imant. Aquesta força mou l'imant fins que s'estabilitza a un punt proporcional al corrent, de manera que al estar l'agulla unida al imant, aquesta marcarà el valor del corrent. Amb aquest funcionament es mesura el valor eficaç de l'ona del

corrent, de forma que aquests equips serveixen tant per mesurar corrent altern com corrent continu.

Per mesurar diferències de voltatges entre dos punts s'ha de col·locar una resistència en sèrie amb la bobina, ja que d'aquesta manera s'aconsegueix que circuli un corrent per l'aparell i per tant es generarà un camp magnètic que mourà l'agulla.

L'esquema bàsic d'aquests equips es mostra a la figura 4.47, on es representa l'interior d'aquest equip de mesura. Com es pot observar aquests equips disposen d'uns ressorts o molles que ajuden a calibrar el valor de l'agulla i a retornar-la a la posició inicial en l'instant en que ja no circula corrent per la bobina.

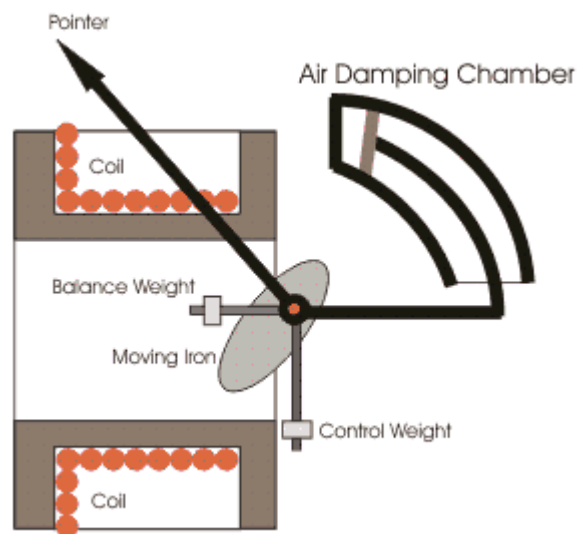


Figura 4.47: Interior d'un equip de mesura d'imatge mòbil

Disposició i elecció dels equips de mesura:

En aquest apartat es justifica en quins punts del circuit s'ha decidit col·locar equips de mesura i quins models s'ha escollit.

En el següent esquema es representen els equips de mesura col·locats en aquest muntatge.

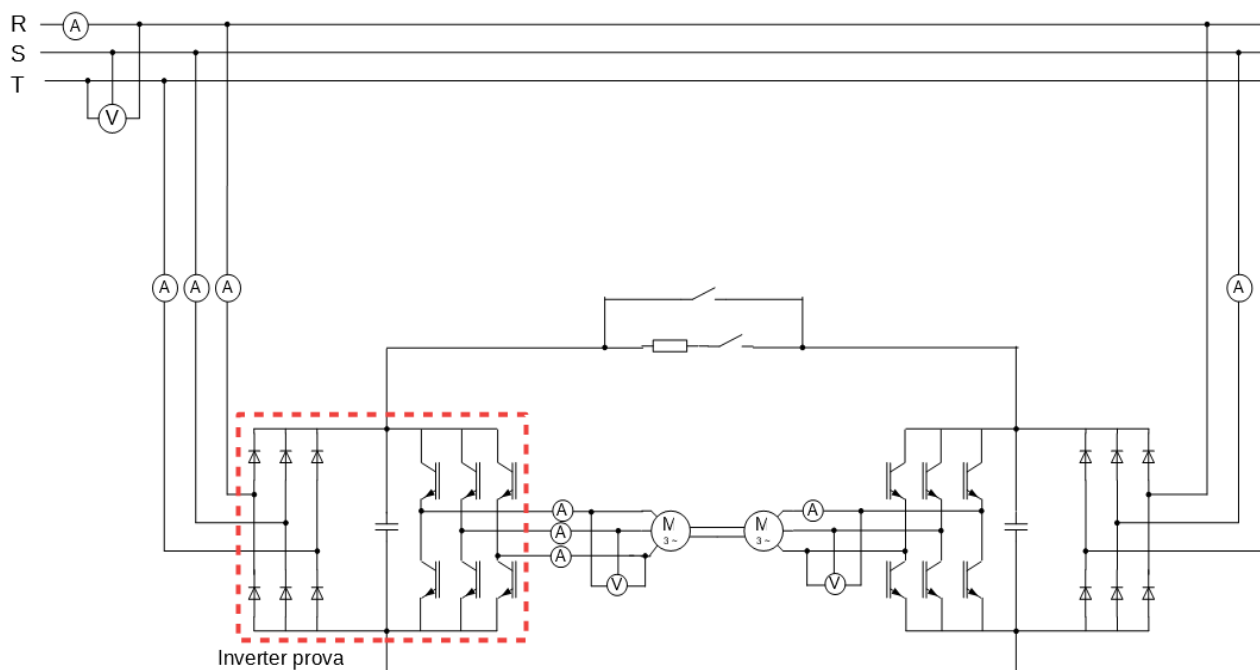


Figura 4.48 Esquema dels equips de mesura en el sistema

Per escollir quins equips de mesura són els més adequats s'ha tingut en compte dues característiques, els valors màxims a mesurar i les mides, ja que disposem d'un armari on s'han col·locat tots els equips.

Aquests equips de mesura estan col·locats a la tapa superior de l'armari, per tant s'ha escollit equips de mesura preparats per situar-se en panells. Respecte a la mida s'ha considerat que els equips de mesura amb dimensions de 72x72 mm són els idonis avaluant la facilitat de visualització dels valors i la mida que ocupa en el nostre sistema. Ja que l'equip està dissenyat per ser controlat per una persona situada davant de l'armari, s'ha considerat que aquesta mida és l'adequada per poder visualitzar correctament les mesures des de la distància que s'observarà.

En aquest apartat es justificarà la col·locació dels equips de mesura separats en diversos grups.

Mesura del corrent i la tensió que consumeix el sistema:

A l'entrada de la xarxa trifàsica s'ha col·locat un amperímetre a una de les 3 fases de manera que permet veure el consum de corrent del sistema i permet a l'usuari controlar que el consum de la xarxa no sobrepassa nivells innecessaris. També s'ha situat un voltímetre amb un

selector que permet mesurar la diferencia de tensió entre dues de les fases de la xarxa per assegurar-se que la tensió entre fases és la correcta.

Aquests dos equips de mesura també permeten calcular la potència total que consumeix una fase del sistema. Tenint en compte que la xarxa elèctrica que alimenta el muntatge és una xarxa trifàsica amb connexió en estrella i sabent que en aquests estils de connexió el corrent que circula per cada línia és igual que el corrent que circula per cada fase, per calcular la potència consumida pel sistema s'ha d'utilitzar l'equació .

Considerant que la bancada de motors que es fa servir en aquest projecte està composta per dos motors d'inducció de corrent màxim 15,4 A, s'ha considerat que l'amperímetre adequat per mesurar el corrent a l'entrada del sistema ha de mesurar com a mínim corrents de 20 A. Per això i considerant que al ser un amperímetre analògic de corrent alterna ha de ser de ferro mòbil s'ha escollit el model d'amperímetre M10225 de la marca Circutor amb les següents característiques i imatge:

Valor màxim mesurat	20 A
Valor mínim mesurat	0 A
Tipus de corrent	AC
Element mòbil	Ferro mòbil
Altura	72 mm
Amplada	72 mm
Profunditat	49 mm
Freqüència màxima	100 Hz
Precisió	1,5 %
Temperatura màxima	+40°C
Temperatura mínima	-25°C



Taula 4.5: Característiques amperímetre AC

Figura 4.49: Imatge amperímetre AC

- Per a la mesura de tensió de la línia trifàsica s'ha escollit un voltímetre analògic de tensió màxima 500 V en corrent alterna, ja que la tensió de la línia trifàsica que s'utilitza a l'empresa teknoUstex és de 400 V AC. El voltímetre seleccionat és el model M10628 de la marca Circutor que permet mesurar la tensió entre dues de les fases que s'escullin. Aquest equip de mesura té les següents característiques i imatge:

Valor màxim mesurat	500 V
Valor mínim mesurat	0 V
Tipus de corrent	AC
Element mòbil	Ferro mòbil
Altura	72 mm
Amplada	72 mm
Profunditat	49 mm
Freqüència màxima	100 Hz
Precisió	1,5 %
Temperatura màxima	+40°C
Temperatura mínima	-25°C

Taula 4.6: Característiques voltímetre AC**Figura 4.50:** Imatge voltímetre AC

Mesura de la potència consumida per cada variador de freqüència:

- A l'alimentació trifàsica de l'inverter Omron s'ha col·locat un amperímetre per controlar quin és el corrent que està consumint l'aparell, i junt amb el valor de la tensió de la línia mesurada pel voltímetre situat entre les fases de l'alimentació podem saber quina és la potència consumida. Com que aquest aparell ja s'ha comprovat que funciona correctament i que el corrent que consumeixen les tres fases està equilibrat, s'ha decidit col·locar només un amperímetre a una de les línies que és suficient per saber el corrent que consumeix. Degut a que el corrent màxim dels motors es 15,4 A i a que les pèrdues en els *inverters* són petites, s'ha considerat que els amperímetres necessaris han de mesurar valors de fins a 20 A. Per això s'ha seleccionat el mateix equip de mesura que el definit en l'apartat anterior.

- Per mesurar quin és el corrent que consumeix l'inverter de prova, s'ha col·locat tres amperímetres en sèrie amb cadascuna de les tres fases de l'alimentació trifàsica de l'aparell. En aquest cas, al no estar comprovat el correcte funcionament de l'equip, els tres amperímetres ens permeten veure si el corrent consumit per les tres fases és equilibrat i per tant és la primera prova de funcionament que se li aplica al *inverter*. A més, igual que en l'inverter Omron, multiplicant el valor del corrent obtingut pel valor mesurat en el voltímetre col·locat a l'entrada del sistema podem saber quina és la potència consumida per aquest *inverter*. Igual que en el cas anterior s'ha considerat que l'amperímetre ha de mesurar com a

mínim corrents de fins a 20 A, per això també s'ha escollit el mateix amperímetre de la marca Circutor.

Mesura de la tensió al Bus de corrent contínua:

La tensió als busos de contínua dels *inverters* és una mesura important, ja que quan es volen connectar els busos dels dos equips s'ha d'estar segur que la diferència de tensió entre ells és pràcticament nul·la, ja que si es connectessin en un instant en que la diferència de tensions és elevada es generaria un pic de corrent que podria ser perjudicial pels equips.

Els equips de mesura necessaris en aquesta funció han de poder mesurar tensions de corrent continu de fins 600 V amb una precisió de com a mínim 2 volts.

Igual que en els altres equips de mesura, per mesurar la tensió als busos es va estudiar la possibilitat d'utilitzar de voltímetres analògic. Després d'un període de recerca es va desestimar la utilització d'aquests equips de mesura perquè les seves característiques no proporcionen la precisió necessària.

Tenint en compte les característiques necessàries es va considerar que els equips de mesura més adequats per aquesta funció són els voltímetres digital, ja que poden mesurar tensions d'aquests nivells i proporcionen una precisió acceptable. El principal inconvenient d'aquests equips és el preu, ja que després de realitzar un estudi de mercat els equips que es van trobar superaven el pressupost previst per equips de mesura.

Finalment i en vista de les dificultats obtingudes s'ha decidit no col·locar cap voltímetre que mesuri les tensions dels busos, en canvi s'han col·locat uns connectors que permeten connectar un multímetre digital. Aquesta decisió s'ha pres ja que a l'empresa teknoUstex disposa de diversos multímetres que permeten mesurar tensions elevades i proporcionen una precisió molt elevada, d'aquesta manera s'estalvia el cost elevat dels voltímetres digitals i s'augmenta la precisió respecte els voltímetres analògics.

Al tractar-se de tensions elevades s'ha seleccionat uns connectors amb protecció de seguretat per evitar que al tocar-los es pugui danyar al usuari. S'ha col·locat dos connectors per cada bus de l'*inverter*, un connectat al positiu del Bus i l'altre al negatiu. Els connectors seleccionats són de la marca HCK i tenen les característiques i imatge següents.

Color	Negre i vermell
Índex de tensió	1 kV
Corrent nominal	32 A
Longitud	33 mm
Orifici de fixació	12,2 mm
Categoria de sobretensió	III



Taula 7: Característiques dels connectors

Figura 4.51: Imatge connector negre

Mesura del corrent que circula pel motor:

- Corrent consumit pel motor alimentat per l'*inverter* Omron: per mesura el corrent que s'està donant al motor alimentat per l'*inverter* Omron s'ha col·locat un amperímetre analògic connectat amb sèrie a unes de les fases a l'entrada del motor. Aquest amperímetre permet veure el consum de corrent del motor i junt amb un voltímetre connectat entre dues de les fases del motor permeten calcular amb facilitat la potència que consumeix el motor. En aquest cas s'ha decidit col·locar només un amperímetre en una de les fases, ja que prèviament s'ha comprovat el correcte funcionament de l'*inverter* Omron i el consum de corrent de les tres fases és equilibrat, de manera que no és necessari col·locar un amperímetre a cadascuna de les fases. Ja que el corrent màxim dels motors dels quals disposem a teknoUstex és de 15,4 A, s'ha seleccionat un amperímetre analògic de corrent alterna amb corrent màxim 20 A. Igual que en els amperímetres mencionats amb anterioritat s'ha seleccionat el mateix model d'amperímetre de la marca Circutor.

- Corrent consumit pel motor alimentat per l'*inverter* de prova: en aquest cas, el variador de freqüència que alimenta el motor és un equip que s'està testejant per tant s'ha decidit col·locar un amperímetre en sèrie a cadascuna de les fases que es connecten al motor, de manera que permeten veure si el corrent entre les fases és equilibrat. Multiplicant el valor del corrent mesurat per aquests tres amperímetres per la tensió mesurada per un voltímetre col·locat entre dues de les tres fases que connecten el motor amb l'*inverter*, es pot calcular amb facilitat la potència que consumida pel motor. Igual que en l'amperímetre col·locat entre el motor i l'*inverter* Omron, s'ha escollit un amperímetre de corrent alterna i de valor màxim 20 A. En aquest cas també s'ha escollit el mateix amperímetre que en les altres ocasions, l'amperímetre analògic de la marca Circutor.

Tensió als terminals dels motors:

Per mesurar la tensió d'alimentació dels motors, s'ha decidit col·locar un voltímetre que mesura la tensió entre dues de les fases que es connecten al motor. En aquest cas la mesura de la tensió no es pot fer de forma directa, ja que l'ona que envia un *inverter* està modulada mitjançant el mètode PWM, de manera que si es mesura directament la tensió obtinguda no té el valor eficaç real de l'ona que rep el motor. Per això s'ha dissenyat un filtre que permet obtenir la forma fonamental de l'ona i d'aquesta manera col·locant un voltímetre analògic en els terminals d'aquest filtre, la mesura de la tensió obtinguda té un valor més acurat al valor real. El càlcul del filtre utilitzat s'explica en l'apartat 4.4.1.3.

Per mesurar aquestes tensions s'ha escollit utilitzar el mateix voltímetre analògic situat a l'entrada de la xarxa triàstica. Aquest voltímetre permet escollir quina tensió entre fases es vol mesurar, d'aquesta manera es pot comprovar que la tensió en els terminals del motor és la mateixa en totes les fases d'alimentació.

Com s'ha explicat anteriorment, multiplicant el valor mesurat per aquest voltímetre pel valor mesurat per l'amperímetre connectat en sèrie a l'entrada del motor, podem saber quina és la potència consumida pel motor.

4.4.1.3 Filtre

La mesura de la tensió d'alimentació dels motors és una mesura significativa per controlar el funcionament d'aquest sistema, ja que permet calcular la potència consumida pel motor i verificar que l'*inverter* compleix la relació tensió-freqüència.

Com s'ha explicat al capítol 2, un *inverter* varia la velocitat de rotació d'un motor d'inducció mitjançant el mètode de modulació PWM, de forma que l'ona que s'envia al motor està formada per una ona quadrada amb cicle de treball variable. Aquest cicle de treball impedeix que es pugui mesurar el valor eficaç de la tensió directament als terminals del motor. Per obtenir una mesura adequada d'aquesta tensió és necessari mesurar el valor eficaç de la tensió de la seva ona fonamental la freqüència de la qual és igual a la freqüència de sincronisme del motor. Per obtenir aquesta ona fonamental s'ha dissenyat un filtre que elimina les ones de freqüència elevades, un filtre passa-baixos. Considerant les necessitats que es tenen en aquest projecte s'ha realitzat un filtre passa-baixos passiu, a la sortida del qual es mesura el voltatge de la ona.

Un filtre passa-baixos passiu és un circuit electrònic format per una resistència i un condensador dissenyat per deixar passar les senyals amb freqüències inferiors a la freqüència determinada i atenuar les freqüències superiors. Com es representa a la figura 4.52, un filtre passa-baixos ideal atenua totalment les freqüències superiors a la freqüència seleccionada. El circuit d'aquest filtre es representa a la figura 4.53.

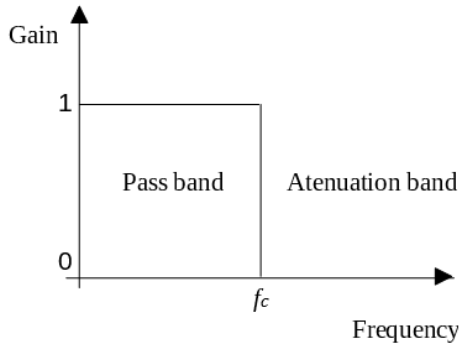


Figura 4.52 Corba guany freqüència filtre passa-baixos

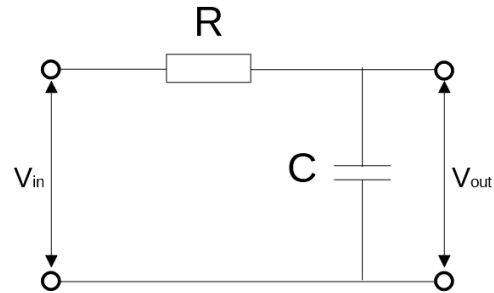


Figura 4.53 Circuit filtre passa-baixos

La freqüència f_c defineix la freqüència de tall del filtre, freqüència que les freqüències més altes partiran una atenuació. Aquesta freqüència s'obté de la fórmula següent:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.6)$$

En el cas d'aquest projecte i al ser un filtre per una xarxa trifàsica s'ha decidit realitzar un filtre RC amb connexió en estrella.

Per establir la freqüència de tall del filtre utilitzat en aquest muntatge s'ha tingut en comte la freqüència dels harmònics fonamentals. El primer harmònic d'una ona PWM és el que porta la gran majoria d'informació i coincideix a la freqüència de modulació de l'ona. Per establir els harmònics de l'ona que es mesurarà en aquest muntatge s'ha realitzat una simulació de la ona amb el programa PSIM. En aquesta simulació s'ha realitzat un circuit que simula l'etapa final de l'inverter. Per representar la tensió al bus s'ha utilitzat dos fonts d'alimentació de 280 V, connectades en sèrie. El control dels IGBT per obtenir una senyal PWM s'ha realitzat superposant una ona triangular i amb tres ones sinusoidals desfasades 120 graus en l'espai. Finalment per simular la càrrega del motor s'ha connectat una càrrega resistiva-inductiva connectada en estrella. L'esquema d'aquesta simulació es representa a la figura 4.54.

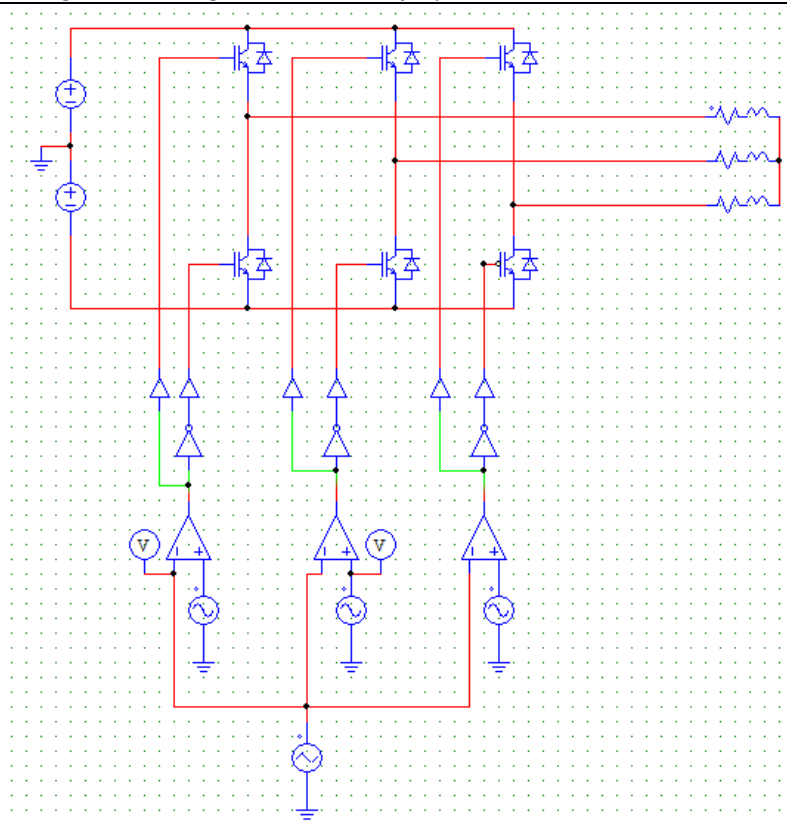


Figura 4.54 Circuit de la simulació amb PSIM

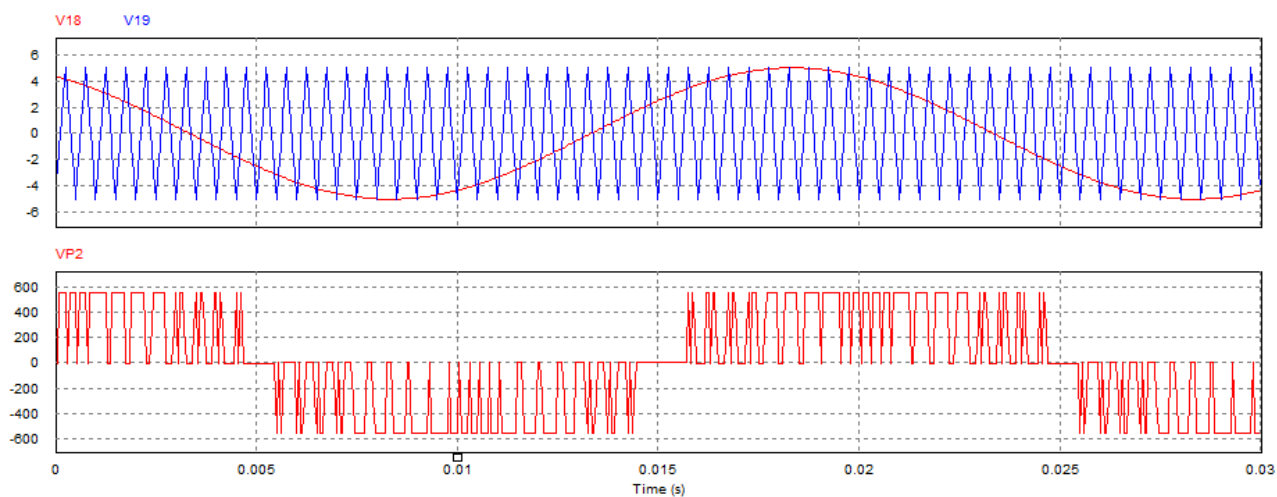


Figura 4.55 Simulació ones PWM amb PSIM

Com s'observa a la figura 4.55, en aquesta simulació s'ha seleccionat una freqüència de modulació de la portadora de 2000 Hz, ja que s'ha considerat que és la freqüència mínima a la que treballen els *inverters* que s'utilitzen a l'empresa. S'ha de tindre en compte que en funció

d'aquesta freqüència el comportament del filtre pot variar, per això s'ha considerat el valor més baix.

La freqüència de modulació nominal dels *inverters* utilitzats és de 50 Hz, per visualitzar la composició de la ona d'alimentació s'ha simulat la transformada ràpida de Fourier.

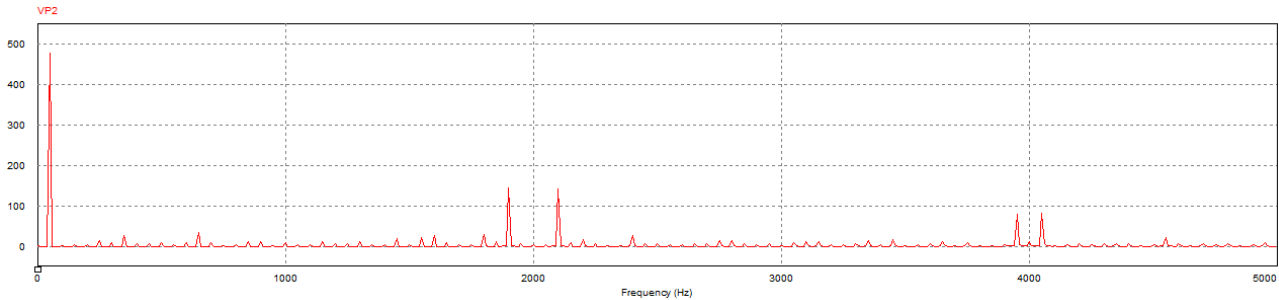


Figura 4.56 Simulació de la resposta freqüencial de la sortida de l'*inverter* amb PSIM

A la figura 4.56 s'observa com el primer harmònic està situat a la freqüència de 50 Hz la freqüència de l'ona moduladora. El següent harmònic està situat a una freqüència de 2000 Hz aproximadament, per tant el filtre realitzat ha de tallar a una freqüència entre 50 i 2000Hz.

Tenint en comte que en alguns casos els *inverters* poden arribar a freqüències de fins a 100 Hz, s'ha considerat que el filtre realitzat no ha d'atenuar les freqüències menors, per assegurar aquest fet s'ha dissenyat un filtre amb una freqüència de tall de 200 Hz aproximadament.

Per establir els valors de la resistència i del condensador s'ha fixat un dels valors, en aquest cas s'ha fixat un condensador amb capacitat de 100 nF. Utilitzant l'equació 4.6 i aïllant R s'obté el resultat següent.

$$R = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 7957,75 \Omega$$

Normalitzant el valor resistiu s'ha escollit utilitzar una resistència de 8,2 kΩ, i per tant la freqüència de tall del filtre resulta igual a 194,1 Hz.

Els filtres tenen un guany que representa la diferencia d'amplitud de la senyal de sortida respecte la senyal d'entrada. Aquest guany varia en funció de la freqüència de l'ona d'entrada. Utilitzant la funció de transferència del filtre i mitjançant el programa Matlab s'ha obtingut la resposta freqüencial mostrada a la figura 4.57.

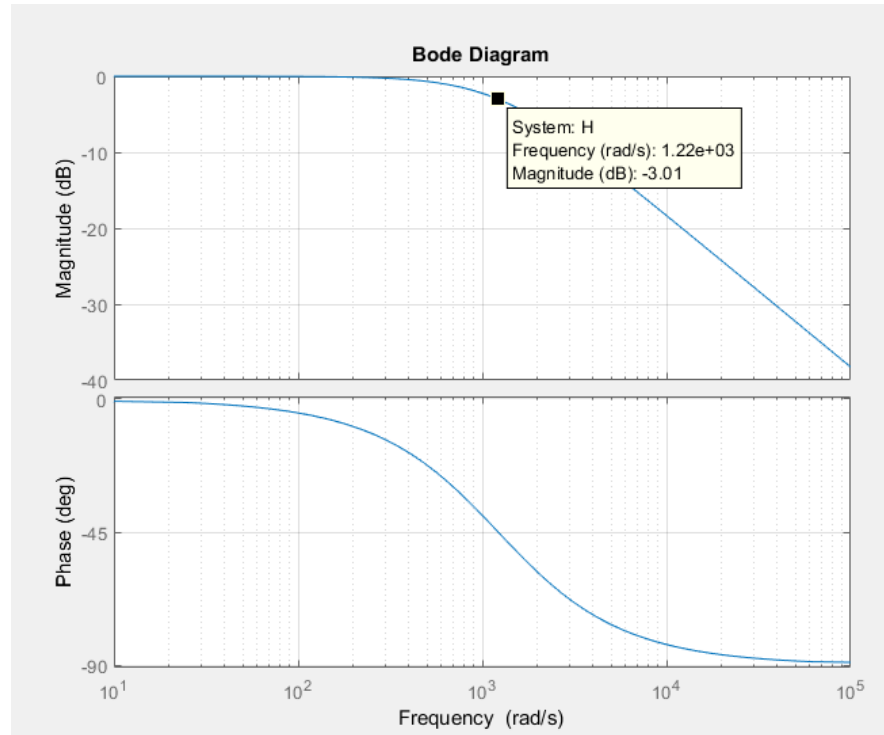


Figura 4.57 Resposta freqüencial del filtre mitjançant Matlab

A causa de que aquest filtre s'utilitza per mesurar la magnitud de la tensió, el desfasament que obté l'ona del filtre no és transcendent. Pel que al guany del filtre, s'observa que a freqüències inferiors a la freqüència de tall, el guany té una pendent molt petita i per tant els seus valors estan pròxims a la unitat. Amb aquest filtre s'aconsegueix que les senyals amb freqüència inferior a 120 Hz aproximadament no pateixin una atenuació elevada, en canvi les senyals amb freqüència superior a aquest valor pateixen una atenuació gradual. Tenint en comte la transformada ràpida de Fourier, en que s'observa que el segon harmònic es troba a 2000 Hz, amb aquest filtre s'assegura que només es tindran les senyals corresponents als primer harmònic.

La resposta freqüencial del filtre mostrada a la figura 4.57, representa l'atenuació de l'ona en funció de la freqüència de la ona sinusoidal que s'aplica l'entrada. En el cas d'aquest muntatge, l'ona que s'aplica a l'entrada del filtre no és sinusoidal i per tant el guany no queda representat exactament per la resposta freqüencial. Per observar el guany aproximat que té aquest muntatge s'ha simulat la utilització del filtre amb el programa PSIM que es mostra a la figura 4.58.

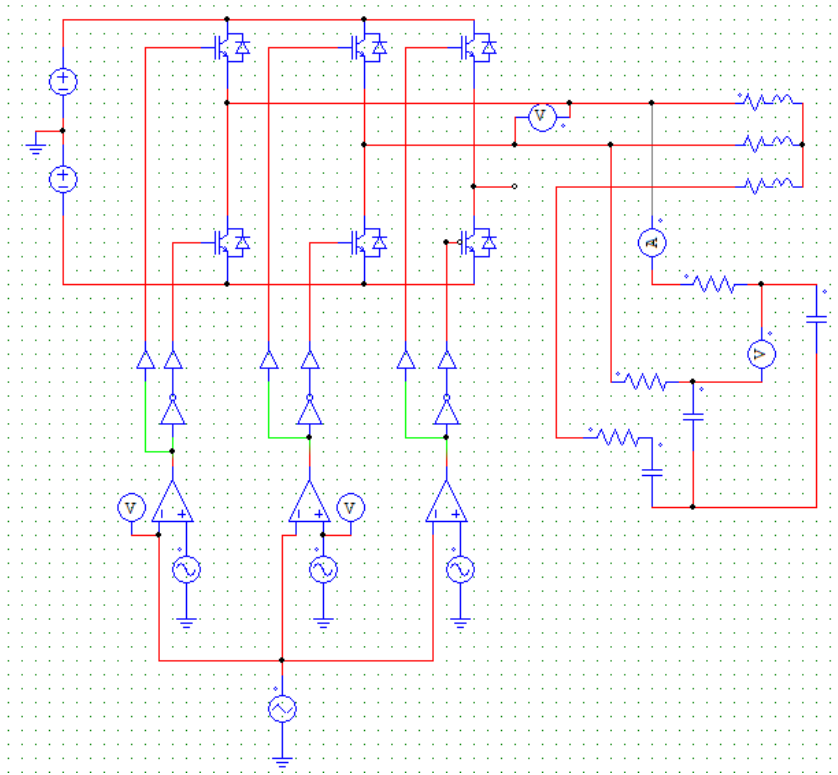


Figura 4.58 Circuit de simulació del filtre amb PSIM

Mitjançant els voltímetres utilitzats a la simulació es representa l'ona a l'entrada i a la sortida del filtre de manera que permet comparar. En aquesta figura s'observa com la tensió de sortida del filtre és una ona sinusoidal amb una freqüència de 50 Hz. Aquesta freqüència coincideix amb la freqüència del primer harmònic de l'ona d'entrada del filtre.

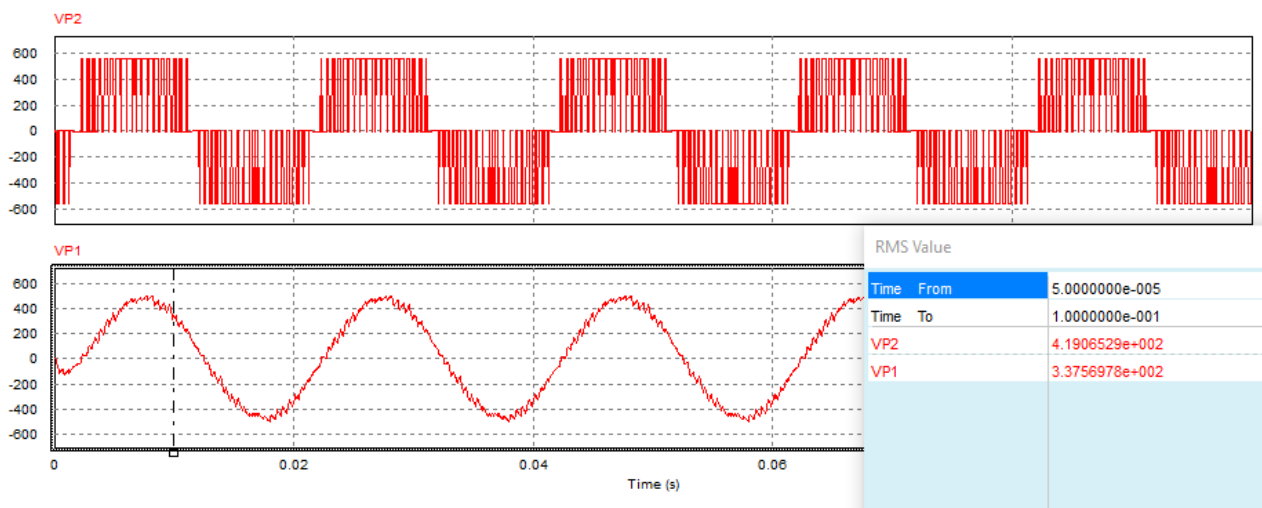


Figura 4.59 Simulació de les ones obtingudes a l'entrada i a la sortida del filtre amb PSIM

Tenint en compte la llei tensió-freqüència dels *inverters* i que en aquesta simulació es representa el funcionament d'un *inverter* amb una freqüència màxima de 50 Hz, el valor eficaç de l'ona de sortida ha de ser lleugerament inferior al valor eficaç de la tensió d'alimentació de l'equip, que en aquest cas és de 400 V. Com s'observa a la pestanya de la figura 4.59, mesurant el valor eficaç de l'ona que alimenta el motor directament als seus terminals s'obté una tensió de 419 V. Aquest valor demostra que no es pot mesurar la tensió directament en bornes del motor, ja que un *inverter* no pot donar una tensió de sortida superior a la seva tensió d'alimentació.

Considerant que el valor eficaç de l'ona en aquesta simulació és de 400 V, s'observa que a la sortida del filtre utilitzat existeix una certa atenuació i per tant el valor eficaç de la tensió de sortida es redueix a 338 V. Utilitzant l'equació que defineix que el guany d'un filtre és el quocient de la tensió de sortida dividit per la tensió d'entrada s'obté que el guany d'aquest filtre és de 0,845. Com es pot observar aquest guany no correspon al guany representat per la figura 4.57 a la freqüència de 50 Hz. Aquest fet es deu a que els guanys representats en aquesta figura corresponen a senyals d'entrada de forma sinusoidal i la senyal d'entrada del filtre utilitzat és modulada. Tenint en compte aquesta atenuació, per mesurar aproximadament el valor eficaç de la tensió de sortida és necessari dividir el valor mesurat pel voltímetre analògic, situat en bornes de la sortida del filtre, per el guany del filtre. Considerant que el guany del filtre a freqüències inferiors a la freqüència de tall es manté constant, s'utilitza el guany obtingut amb la simulació com el guany del filtre. Per tant el valor obtingut pel voltímetre analògic s'ha de dividir per 0,845 per obtenir una aproximació del valor eficaç de l'alimentació del motor.

Tenint en compte que la resistència seleccionada es de 8,2 k Ω i que el condensador és de 100nF s'ha calculat la potència màxima que circularà el filtre per escollir la potència màxima de la resistència. Per realitzar aquest càlcul s'ha calculat la impedància del filtre a la freqüència nominal de 50 Hz.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 100e-9} = 31\,830\,\Omega$$

Com s'observa a l'equació s'ha seleccionat un condensador petit que generara una impedància al condensador molt elevada. Aquesta capacitat provoca un desfasament elevat de la tensió de sortida però degut a que aquest filtre només s'usa per mesurar el valor eficaç de la tensió s'ha prioritzat disminuir el corrent que circula el filtre.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{8200^2 + 31830^2} = 32870\,\Omega$$

Utilitzant la llei d'Ohm, es calcula la potència del filtre, mitjançant el valor eficaç de la tensió, 400 V.

$$P = \frac{V^2}{Z} = \frac{400^2}{32870} = 4,867 \text{ W}$$

Per tant la potència màxima estimada és de 4,867 W. Tenint en compte aquest valor i per assegurar que la resistència no es farà malbé s'ha decidit utilitzar una resistència de 8200 Ω amb una potència màxima de 25 W.

Tenint en compte les característiques que ha de tindre la resistència s'ha seleccionat una resistència de muntatge sobre panell de la marca Arcol el número de fabricant de la qual és HS25 8K2 J.

Pel que fa al condensador, per assegurar que pot suportar la diferència de tensió que se li aplica s'ha decidit utilitzar un condensador de 100 nF amb una tensió màxima de 700 V AC i muntatge sobre panell. El condensador seleccionat és un condensador de la marca Kemet amb número de fabricant C4BSWBX3100ZAFJ.

4.4.1.4 Altres elements utilitzats

A més a més dels sistemes de control, les proteccions i els equips de mesura s'ha utilitzat altres elements que permeten el funcionament correcte del muntatge. Els elements que es definiran a continuació són el connector d'alimentació, els terminals de connexió externs i el cablejat.

L'alimentació del sistema es realitza mitjançant una xarxa trifàsica amb neutre. Per connectar aquest sistema s'ha utilitzat un connector industrial amb tres connexions per la xarxa trifàsica, una connexió per el neutre i una connexió per la presa de terra. El connector seleccionat és el model 5 552 39 de la marca Legrand.



Figura 4.60 Connector xarxa trifàsica

Atès que el sistema s'ha realitzat per poder provar diferents *inverters* el sistema de connexió ha de l'alimentació i del bus ha de ser el més estàndard possible per englobar un rang d'*inverters* gran. Per escollir quins terminals s'utilitza en aquest sistema s'ha estudiat els diferents tipus de connexions que tenen els *inverters* que es reparen a l'empresa. S'ha detectat una sèrie de terminals diferents i per tant s'ha desestimat la possibilitat d'utilitzar un terminal concret. Per augmentar el rang de possibles connexions s'ha decidit col·locar una bornera a l'exterior de l'armari de manera que es pot connectar un cable que a l'altre extrem té el terminal necessari per connectar a l'equip.

Els terminals seleccionats és el model 0707073 de la marca Phoenix Contact.



Figura 4.61 Terminal de connexions

Tenint en compte que el corrent màxim que circularà en aquest sistema és de 20 A, s'ha considerat necessari que el cablejat que forma el sistema tingui una secció de 4mm.

Per l'alimentació del sistema s'ha decidit utilitzar una manega formada per 5 conductors que es connecten al connector mencionat anteriorment. Per l'alimentació dels *inverters* i dels motors s'ha utilitzat una mànega de 4 cables formada per tres conductors per les fases i un per la presa de terra.

4.4.2 Disseny mecànic

El disseny mecànic del element consisteix en la distribució i col·locació dels elements que formen el sistema per aconseguir obtenir un sistema robust i amb un funcionament senzill. Per aconseguir-ho s'ha decidit col·locar tots els elements elèctrics, exceptuant la bancada de motors, dins d'un armari elèctric de manera que per utilitzar el sistema només s'hagi de connectar l'inverter de prova i l'alimentació de la xarxa. En aquest armari també es col·locaran els equips de mesura i els sistemes de control, així doncs l'usuari tindrà tots els elements necessaris per fer funcionar el sistema a l'abast.

4.4.2.1 Armari utilitzat

Per col·locar tots els elements fixos del muntatge s'ha escollit utilitzar un armari de la marca Telmag que disposava l'empresa prèviament a la realització d'aquest muntatge. Al tractar-se d'un armari obtingut fa uns certs anys no es disposa dels plànols proporcionades pel fabricant. Per això s'ha realitzat un disseny en tres dimensions mitjançant el programa SketchUp amb el que s'ha obtingut els plànols mostrats a la figura 4.62. Les dimensions s'especifiquen als plànols adjunts a l'annex 2.

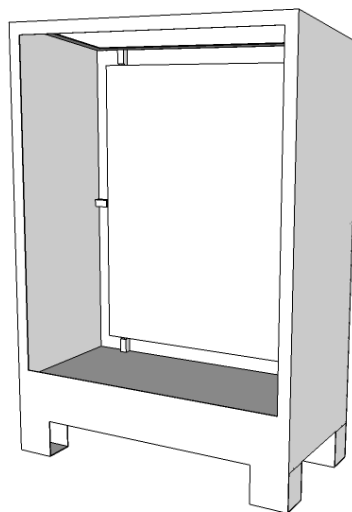


Figura 4.62 Vista isomètrica armari

Aquest armari està format per planxes de ferro de 2 mm de gruix i disposa d'una tapa frontal i d'una tapa superior. L'obertura de la tapa posterior permet col·locar tots els elements i la tapa superior permet col·locar els elements de control i mesura.

La distribució dels elements situats en aquest armari es divideix en tres grups: l'*inverter*, components elèctrics i elements de control i mesura.

- *Inverter*: Com s'ha mencionat al capítol dels elements utilitzats, en aquest sistema s'utilitza un *inverter* de la marca Omron. Aquest equip es col·loca a la part inferior de l'armari.
- Components elèctrics: Com s'observa a la figures 4.62 l'armari disposa d'una xapa metàl·lica a la part interior separada 20 mm de la superfície de l'armari. Aquesta tapa permet col·locar els components elèctrics sense necessitat de perforar la xapa exterior.
- Elements de control i mesura: Com ja s'ha mencionat els equips de mesura i els interruptors que permeten controlar el funcionament del sistema es col·locaran a la tapa superior de forma que l'usuari els té tots a l'abast i distribuïts de forma que són fàcil d'identificar.

Col·locació de l'*inverter* utilitzat:

L'*inverter* de la marca Omron que s'incorpora en el sistema s'ha col·locat a la part inferior de l'armari, recolzat horitzontalment. Les dimensions d'aquest equip, mencionades a l'apartat 4.3.2, són de 390x490x250 mm. Tenint en compte les mides de l'armari i el gruix de la xapa que el forma, la profunditat de l'armari és de 393 mm, per tant aquesta mida és la justa per col·locar l'equip. Tot i això la xapa on es col·locaran els components elèctrics resta 20 mm d'aquesta profunditat. Per aconseguir col·locar l'equip dins l'armari s'ha realitzat un tall a la xapa que permet col·locar l'equip i disposar de l'espai suficient per col·locar els components elèctrics. Mesurant les mides de l'equip i la situació de la xapa s'ha decidit realitzar un tall centrat a la part inferior de 250mm d'alçada per 500 mm d'amplada. A la figura 4.63 es representa l'armari amb el tall de la xapa realitzat i amb l'*inverter* col·locat.

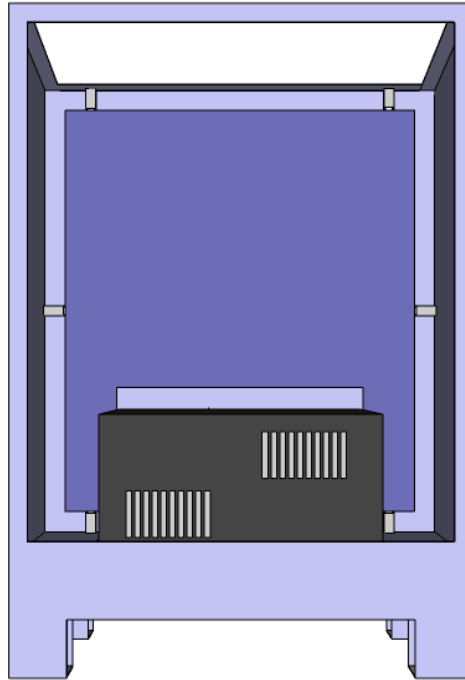


Figura 4.63 Vista frontal de l'armari amb l'inverter incorporat

Distribució dels components elèctrics:

Com s'ha mencionat anteriorment els components elèctrics s'han col·locat a la xapa metàl·lica situada al interior del armari. Hi ha dos tipus de components que es col·locaran en aquesta xapa, els contactors i interruptors i els que formen els filtres.

Els contactors i interruptors s'han muntat sobre una carril DIN EN 50022, de 7,5 mm de profunditat. El carril DIN utilitzat té una longitud de 590 mm i els components col·locats es mostren a la següent llista:

- 3 contactors de 18 A amb un bloc de contactes auxiliars cadascun
- 2 contactors de 18 A amb un relé tèrmic cadascun
- 2 contactors de 12 A
- 1 interruptor magnetotèrmic 20 A
- 1 interruptor temporitzat

En aquest panell també s'han col·locat els components elèctrics que formen el filtre, que són 6 resistències de 8,2 k Ω i 6 condensadors de 100 nF. Degut a que els components utilitzats són de muntatge sobre panell, s'ha utilitzat una xapa d'un material aïllant anomenat Celotex, les característiques del qual es defineixen al següent apartat.

A la figura 4.64, es mostra el disseny de l'armari amb l'inverter i els components elèctrics.

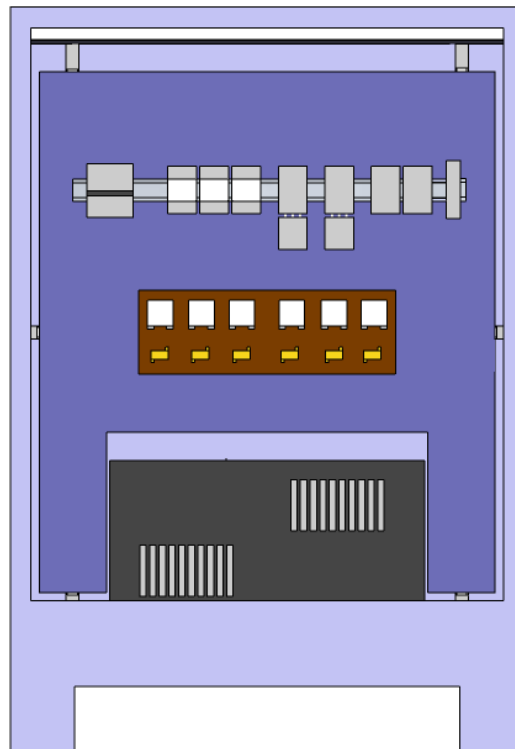


Figura 4.64 Vista frontal de l'armari amb tots els elements incorporats

4.2.2.2 Tapa superior del armari

Al ser un armari reutilitzat, la tapa disposava d'una botonera incorporada, la intenció de col·locar els equips de mesura i els sistemes de control del muntatge a la tapa superior impedia la reutilització de la tapa incorporada en l'armari. Per aquest motiu s'ha decidit reemplaçar la aquesta tapa per una de fabricació pròpia. Tenint en compte les dimensions del armari, la tapa realitzada ha de ser un rectangle de 790mm de llargada per 390 mm d'amplada, el gruix es variable depenent del material utilitzat. Aquesta tapa ha de tenir una certa resistència a la torsió per evita que es faci malbé en cas que la força que se li apliqui sigui elevada.

Tenint en compte les característiques que ha de tindre aquesta tapa s'ha estudiat diversos materials dels quals podria estar formada. La primera proposta es basava en substituir la tapa per una xapa d'alumini, ja que és un material fàcil de mecanitzar i compleix les característiques necessàries. Tot i això la utilització d'aquest material s'ha desestimat pel fet que és un material amb una bona conducció elèctrica de manera que si es produís un mal contacte podria provocar un mal funcionament de l'equip. A més a més, per obtenir les característiques mecàniques es necessitava un xapa d'un gruix considerable i, tenint el compte el preu actual d'aquest material, el cost de la xapa superava el pressupost previst.

Per reduir el cost s'ha considerat la possibilitat d'utilitzar materials derivats del plàstic que tenen característiques mecàniques semblants. Després d'una minuciosa cerca s'ha seleccionat quatre possibles materials: la fibra de vidre epoxi, el cotó fenòlic i el paper fenòlic.

En aquest apartat s'exposen les característiques dels diversos materials i es justifica l'elecció del més idoni per la utilització que se li ha de donar.

- Fibra de vidre Epoxi:

Una placa de fibra de vidre Epoxi és un laminant estratificat fabricat a base de fibra de vidre impregnat amb resina Epoxi termoendurida. Aquest material es caracteritza per tindre unes propietats dielèctriques i mecàniques molt bones. Aquest material té una gran resistència mecànica a la tensió de flexió perpendicular a les capes, que és la que es necessita en aquest projecte per la situació en que es col·locarà la placa. Respecte a les característiques elèctriques aquest material té una resistència elèctrica elevada de manera que es pot utilitzar com a aïllant elèctric.

Per últim, aquest material té un índex d'absorció del aigua baix. Aquest és un factor important, ja que un índex d'absorció d'aigua alt significa que si l'equip treballa en un ambient humit absorbirà una gran quantitat d'aigua que podria disminuir les seves característiques elèctriques.

La temperatura de treball no és un coeficient determinant en aquest treball, ja que els components utilitzats en l'armari no són components que treballin a temperatures elevades.

- Cotó fenòlic:

El cotó fenòlic, també anomenat Celotex, és un material estratificat fabricat a base de teixit de cotó impregnat amb resines fenòliques termoendurides. Aquest material s'identifica per tindre una bona resistència mecànica i una gran absorció de les vibracions. També és un material molt compacte que disposa d'una gran cohesió de les làmines. Les característiques del material es mostren a la taula 8 proporcionada pel distribuïdor al que s'ha encomanat el subministrament.

DENOMINACION DEL MATERIAL		
Tipo según norma	IEC 893	PFCC 201
	DIN-EN-60893	
Tipo según norma	DIN 7735	Hgw2082
Tipo según norma	NEMA	C
Aplicación (*)		K
PROPIEDADES MECANICAS		Valores
Tensión de flexión a la rotura perpendicular a la laminación (temp. 20°C)	MPa	100
Módulo aparente de elasticidad en flexión	MPa	7 x 103
Resistencia a la tensión	MPa	80
Resistencia a la compresión perpendicular a las capas	MPa	350
Resistencia al impacto (Charpy) paralela a las capas	Kj/m2	8,8
Resistencia a la hendidura paralela a las capas	MPa	25
PROPIEDADES FISICAS		Valores
Densidad	g/cm3	1,3 ÷ 1,4
Índice de temperatura	C°	120
Absorción de agua (para espesor 3 mm.)	mg	249

Taula 8: Característiques Celotex

Com es pot observar a la taula aquest material té una bona resistència a la tensió de flexió perpendicular a les làmines i una molt bona resistència a la compressió perpendicular a les capes.

En referència a la resistència elèctrica, com s'observa té una resistència perpendicular a les lamines molt més elevada que la resistència paral·lela. Aquesta diferencia no es rellevant, ja que els equips que es col·locaran en aquesta xapa es col·locaran de forma perpendicular, de manera que la resistència elèctrica perpendicular és suficientment bona en aquest cas.

Per últim l'índex d'absorció d'aigua no és tant baix com en el cas de la fibra de vidre Epoxi però tenint en compte que el taller on es treballarà amb aquest equip la humitat no és elevada es considera suficient.

- Paper fenòlic:

Aquest material, també anomenat Baquelita, es un laminat estratificat de paper *kraft* impregnat amb resines fenòliques termoendurides. Es caracteritza per tindre una gran resistència mecànica, unes grans propietats dielèctriques i una gran resistència a la corrosió. Les característiques principal d'aquest material es mostren a la taula 9, proporcionada pel mateix distribuïdor.

DENOMINACION DEL MATERIAL		
Tipo según norma	IEC 893	PFCP 201
	DIN-EN-60893	
Tipo según norma	DIN 7735	Hp2061
Tipo según norma	NEMA	X / XP
Soporte		Paper / fenólico
Resina		Fenólico / Phenolic
Aplicación (*)		EK
PROPIEDADES MECANICAS		Valores
Tensión de flexión a la rotura perpendicular a la laminación (temp. 20°C)	MPa	135
Módulo aparente de elasticidad en flexión	MPa	7 x 103
Resistencia a la tensión	MPa	120
Resistencia a la compresión perpendicular a las capas	MPa	300
Resistencia a la hendidura paralela a las capas	MPa	10
PROPIEDADES FISICAS		Valores
Densidad	g/cm3	1,3 ÷ 1,4
Índice de temperatura	C°	120
Absorción de agua (para espesor 3 mm.)	mg	550

Taula 9: Característiques principals Baquelita

Respecte a les característiques mecàniques mostrades a la taula, s'observa que aquest material té una bona resistència mecànica a la tensió per flexió perpendicular a les capes.

La resistència elèctrica paral·lel i perpendicular a les plaques són de valor molt elevat de manera que aquest material és un bon aïllant elèctric.

L'índex d'absorció d'aigua d'aquest material té un nivell elevat de manera que només es podria utilitzar en ambients molt secs, ja que a la mínima humitat que es produís el material absorbiria una quantitat d'aigua elevada i reduiria les seves característiques elèctriques.

Comparació i elecció del material utilitzat:

Tenint en compte les característiques mecàniques dels tres materials s'ha considerat que el gruix adequat d'aquesta xapa ha de ser de 10 mm, ja que amb aquest gruix s'obté una resistència mecànica suficient i es poden col·locar tots els elements incorporats.

Considerant el volum de la xapa i la densitat de cada material s'ha obtingut que el pes que tindria la xapa en cada cas és:

- Fibra de vidre Epoxi: Densitat aproximada de $1,8 \text{ g/cm}^3$ per tant que el pes seria de 5,7 kg
- Celotex: Densitat aproximada de $1,35 \text{ g/cm}^3$ per tant el pes total seria 4,16 kg
- Baquelita: Densitat aproximada de $1,35 \text{ g/cm}^3$ per tant el pes total seria 4,16 kg

Tenint en compte el pes total de la xapa els materials amb millors condicions són el Celotex i la Baquelita.

Com es pot observar les plaques fabricades amb fibra de vidre Epoxi són les que tenen les millors característiques mecàniques i elèctriques, ja que la seva resistència a la tensió de flexió perpendicular és gairebé tres vegades superior a la dels altres dos materials, la resistència elèctrica es considerablement més elevada i l'índex d'absorció d'aigua molt més baix. Tot i això s'ha descartat la utilització d'aquest material per la dificultat de mecanitzar, ja que a aquesta tapa se li han de realitzar certs orificis per incorporar els equips i la fibra de vidre és molt abrasiva deteriora ràpidament les eines amb les que es mecanitza. Tenint en compte les prestacions mecàniques i elèctriques aquest material està dissenyat per ser utilitzat en equip que treballen a alta tensió i això encareix considerablement el seu preu.

La baquelita i el celotex són dos materials amb característiques semblants i les seves característiques mecàniques i elèctriques es consideren acceptables tenint en compte l'aplicació que tindrà. Tot i això s'ha considerat que el material idoni per la fabricació de la tapa de l'armari és el celotex, ja que la baquelita té un índex d'absorció d'aigua bastant elevat i encara que el taller on s'utilitzarà l'equip no caracteritza per tenir una humitat elevada s'ha preferit escollir aquest material. Un altre factor determinant per escollir la utilització del celotex és que la cohesió de les plaques que formen la baquelita és baixa i per tant al mecanitzar-la es trenca amb facilitat

Distribució dels elements a la tapa:

Una vegada escollit el material de qual estarà fabricat la xapa de la tapa superior s'ha procedit a la disseny i distribució dels elements col·locats en aquesta tapa. La llista següent representa tots els elements que s'hauran de col·locar.

- 9 Amperímetres analògics amb dimensions de 72x72mm.
- 3 Voltímetres analògics amb dimensions de 72x72 mm
- 4 polsadors normalment oberts de diàmetre de 22mm
- 3 polsadors normalment tancats de diàmetre de 22mm
- 1 polsador d'emergència de diàmetre de 40 mm
- 1 interruptor seccionador amb dimensions de 60x60 mm
- 5 pilots lluminosos de diàmetre de 22 mm

- 4 connectors femella per terminals banana
- 1 display de comandament de l'inverter Omron

Les dimensions de la tapa són de 790x390 mm però l'armari disposa d'un marc que és on es fixara la xapa de celotex. De manera que l'espai útil de la xapa queda reduït a unes dimensions de 735x339 mm. La distribució dels elements a la tapa s'ha dissenyat de forma que els equips de mesura i els elements de control de cada etapa estiguin dividit, de manera que la tapa la formen tres parts: elements referents a l'alimentació de la xarxa, elements referents al *inverter* de prova i elements referents a l'*inverter* del sistema. Els elements comuns com l'interruptor principal i el polsador d'emergència s'han situat al mig de la tapa per facilitar la seva visualització i disponibilitat en cas d'emergència.

Per dissenyar aquesta distribució s'ha tingut en compte que la mecanització de la xapa es realitza manualment i per tant existeix una creta complicació en col·locar equips molt a prop l'un de l'altre, ja que si es produís una errada en la mecanització es podria trencar el material. Per tant s'ha considerat que la distància mínima a la que es poden col·locar dos elements no consecutius és de 10 mm.

A la figura 4.65 es mostra el disseny de la tapa. Com es pot observar s'ha separat els diferents equips de mesura i dispositius de control depenent de la part del circuit on actuen.

A l'esquerra de la tapa del armari disposem dels equips que actuen sobre l'alimentació de la xarxa, que consisteixen en els següents elements:

- Mesura de corrent i tensió de la xarxa: Com s'ha explicat en el capítol d'equips de mesura, es disposa d'un amperímetre col·locat en sèrie a una de les fases de la xarxa trifàsica i d'un voltímetre que permet mesurar les diferències de tensions entre les fases.
- Interruptor principal: S'ha col·locat un interruptor seccionador de dos posicions per controlar l'alimentació dels circuits.
- Polsador d'emergència: Es disposa d'un polsador d'emergència que permet aturar l'alimentació del sistema en cas d'emergència.
- Polsadors d'arrancada-aturada: S'ha col·locat un polsador de color verd que dona pas a l'alimentació del circuit i un polsador de color vermell que atura aquesta alimentació. Amb l'objectiu de que l'usuari visualitzi si el sistema està alimentat s'ha col·locat un pilot lluminós de color groc que s'encén en cas que s'alimenti el circuit.

Al centre de la tapa del armari s'ha col·locat els equips referents al *inverter* incorporat al sistema, l'*inverter* Omron. Els elements que formen aquesta secció són els següents:

- Mesura de corrent a l'entrada de l'equip: Per mesurar el corrent consumit per aquest *inverter* s'ha col·locat un amperímetre a una de les fases d'alimentació.
- Mesura de tensió i corrent del motor: Per tindre un control de la potència consumida o generada pel motor connectat a a quest equip s'ha col·locat un amperímetre a una de les fases d'alimentació del motor i un voltímetre que permet mesurar la diferencia de tensió entre les fases d'alimentació del motor.
- Polsadors d'arrancada-aturada: Per controlar l'alimentació de l'equip s'ha col·locat un polsador verd i un polsador vermell que permeten activar o desactivar l'alimentació. Per informar a l'usuari sobre l'estat de l'alimentació de l'*inverter* s'ha col·locat un pilot lluminós de color verd que s'encén en cas que l'alimentació de l'equip estigui activada.
- Punts de mesura del Bus DC: Com s'ha explicat al capítol d'equips de mesura, per mesurar la tensió que té el bus de corrent continu d'aquest equip s'ha col·locat dos connectors que permeten mesurar la tensió mitjançant un multímetre.
- Display de control de l'equip: Per controlar el funcionament de l'*inverter*, s'ha col·locat un display proporcionat pel propi fabricant que permet variar la velocitat de gir del motor mitjançant el seu teclat.

Finalment a la part dreta de la tapa s'ha col·locat els equips referents a l'*inverter* que s'està provant. Els equips que formen part d'aquest últim bloc són els següents:

- Mesura del corrent consumit per l'equip: Per obtenir un control de quin és el corrent consumit per l'*inverter* de prova i verificar que aquest corrent és equilibrat en les tres fases s'ha col·locat tres amperímetres en sèrie a les tres fases d'alimentació de l'equip.
- Mesura de la tensió i corrent consumit pel motor: Per mesurar la potència consumida pel motor alimentat per l'*inverter* de prova s'ha connectat tres amperímetres en sèrie a les tres fases d'alimentació del motor i un voltímetre que permet mesurar la diferencia de potencial entre les tres fases.
- Polsadors arrancada-aturada: Per controlar l'alimentació de l'equip que es prova s'utilitza dos polsadors, un vermell i un verd, amb els quals s'activa o es desactiva l'alimentació. Per avisar visualment a l'usuari sobre si l'*inverter* està alimentat s'ha connectat un pilot lluminós de color verd que s'encén quan l'alimentació està activa.

- Punts de mesura tensió Bus DC: Igual que en l'*inverter* Omron, s'ha col·locat uns connectors que permeten mesurar la tensió del bus de corrent continu utilitzant un multímetre.

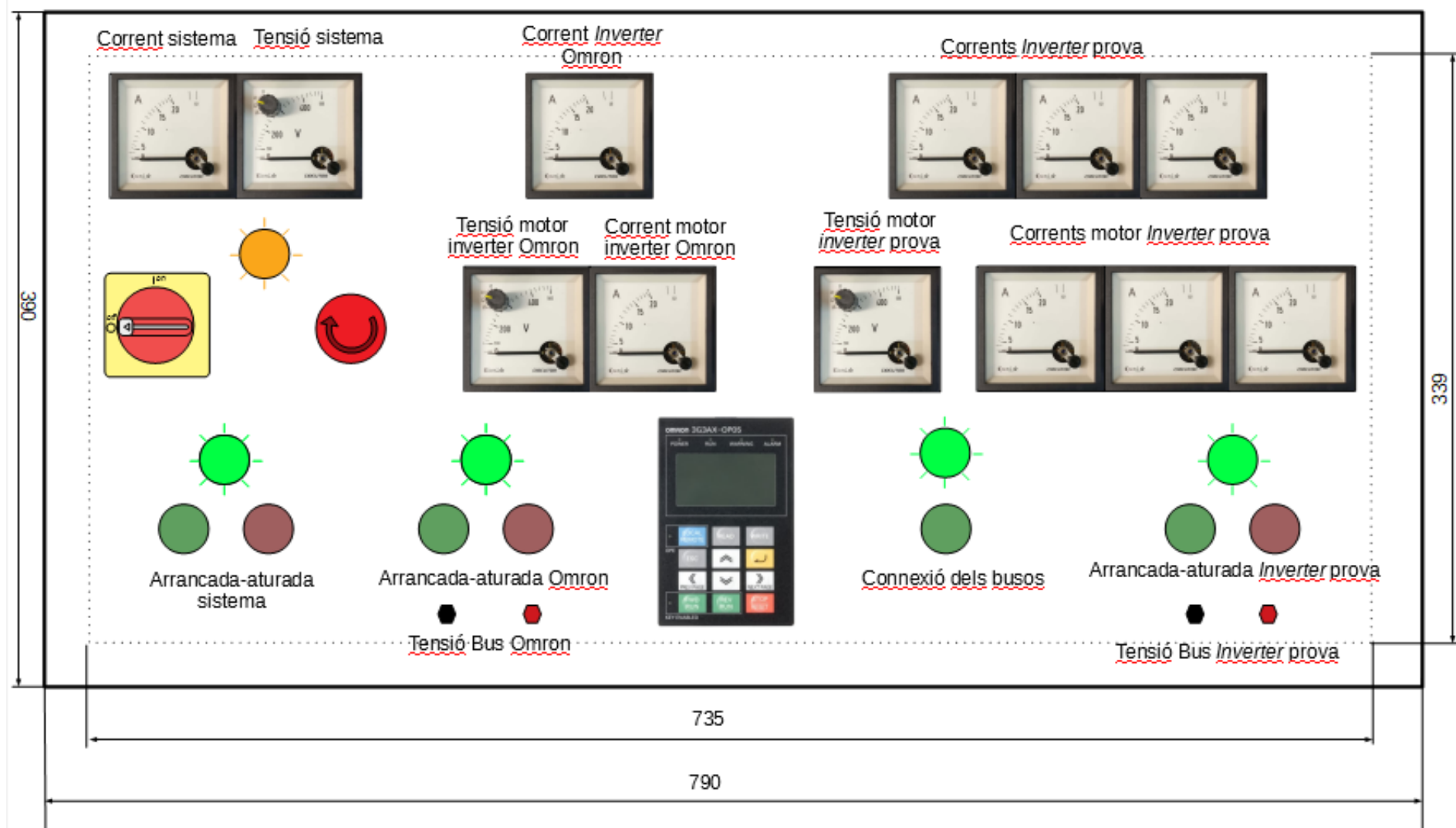


Figura 4.65 Distribució dels elements a la tapa dels armari

5. Impacte ambiental

5.1 Introducció

Segons un estudi realitzat per l'agència internacional de l'energia, iea, en les últimes 4 dècades l'energia consumida globalment ha augmentat un 200%. Aquest augment del consum energètic es deu a un augment de la industrialització i de la globalització de forma que es consumeix més energia per culpa del augment de la producció i per l'augment del transport global d'aquests productes. En aquest període de temps l'energia que més ha crescut ha sigut l'energia elèctrica que ha passat d'ocupar el 10% de l'energia consumida al 20%.

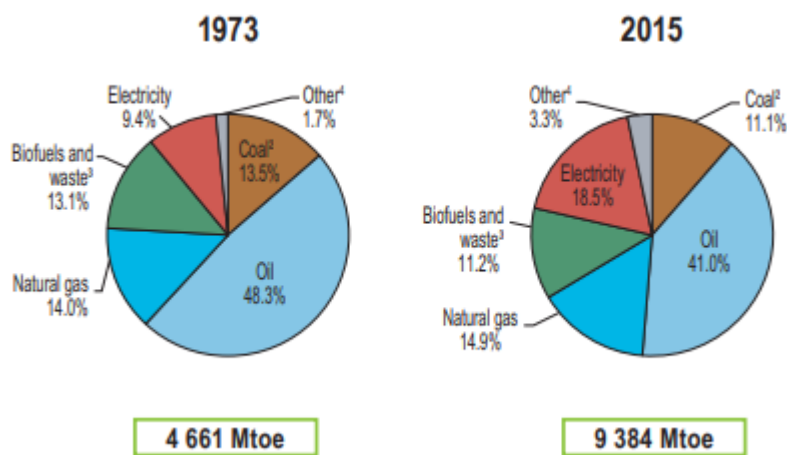


Figura 5.1: Comparació del consum energètic del 1973 i el 2015

Font: Key World Energy Statistics, International Energy Agency

En el cas de l'energia elèctrica el creixement en les ultimes 4 dècades ha sigut de gairebé el 400%.

L'energia elèctrica s'utilitza a gairebé tot arreu però la majoria del consum d'aquesta energia es troba a les indústries, que ocupen un 42% del consum total. [8]

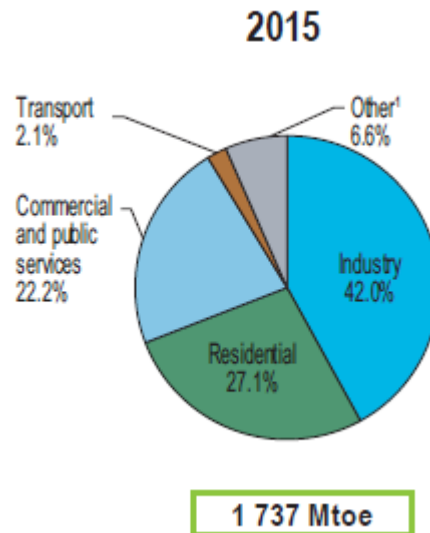


Figura 5.2: Percentatge de consum elèctric al 2015

Font: Key World Energy Statistics, International Energy Agency

Segons la tendència actual del consum energètic es preveu que el consum segueixi augmentant fins a créixer un 30% al 2040. Dins d'aquest creixement es preveu que el consum d'energia elèctrica augmenti un 68% aproximadament. Aquest increment de la demanda energètica té un afectació clara en el medi ambient, ja que es preveu que al 2040 les emissions de CO₂ augmentin en un 40%. [9]

Tot i que els experts apunten que al 2040 un 29% de l'energia elèctrica consumida serà generada de forma renovable, reduir el consum energètic és un factor determinant per frenar l'impacte del canvi climàtic. [10]

L'empresa ABB ha realitzat un estudi que determina que 2/3 de l'energia elèctrica consumida a les indústries es consumida per motors elèctrics. Aquests consum representa un 28% del consum elèctric global. La utilització de variadors de freqüència per controlar la velocitat d'aquest contribueix a reduir aquest consum, ja que mitjançant el mètode de modulació PWM es millora l'eficiència dels motors.

5.2 Impacte del sistema realitzat

Amb el muntatge realitzat en aquest projecte s'aconsegueix millorar l'eficiència energètica d'un sistema de prova de variadors de freqüència. Com s'ha comprovat amb el sistema dissenyat es pot reduir fins a un 40% l'energia necessària per verificar aquests equips. Aquesta muntatge s'ha realitzat amb les especificacions necessàries de l'empresa teknoUstex i per tant té un efecte beneficiari a la reducció del seu consum energètic. Modificant les especificacions d'aquest muntatge per que concordin amb les necessitats d'altres empreses, aquest sistema de muntatge es pot aprofitar en tots els àmbits on es necessiti testejar aquests equips. Per culpa de que aquests equips no es poden aplicar directament a la indústria, es considera que la utilització d'aquest muntatge no reduirà significativament el consum energètic global. Tot i això a les indústries s'utilitza un sistema semblant, que consisteix en un unir els busos de varis dels *inverter* utilitzats de forma que quan d'aquests equips està frenant envia energia al bus i pot ser consumida per un altre equip.

5.2.1 Impacte dels components utilitzats

A l'hora d'escollir els elements que s'han utilitzat per el muntatge d'aquest projecte s'ha procurat que tots els elements complissin les normes d'eficiència energètica.

En el cas de la bancada de motors s'ha assegurat que compleixi la norma IEC 60034-30 que defineix el grau d'eficiència energètica en funció de la potència, el rendiment i els pols que formen el motor. Segons aquesta normal els motors utilitzats compleixen amb el nivell d'eficiència 2 d'un màxim de 3.

Respecte als components elèctric utilitzats s'ha verificat que tots els elements compleixin la normativa RoHS Compliance, que assegura que els components no estan formats per elements perillosos o nocius. Apart d'aquesta normal els elements utilitzats de la marca Schneider Electric formen part del grup de components Creen *Premium*, d'aquesta manera el fabricant assegura que els components compleixen les polítiques d'impacte ambiental.

6. Pressupost

6.1 Cost de fabricació per l'empresa

En aquest apartat es justificarà el cost que han tingut els elements d'aquest muntatge per l'empresa tenint en compte que aquest cost no és el cost global, ja que alguns dels elements utilitzats ja els disposava l'empresa prèviament al disseny i muntatge d'aquest projecte. Aquests elements són els següents:

- Bancada de motors d'inducció trifàsics de 7,5 kW
- *Inverter* Omron amb una potència màxima de 37 kW
- Armari elèctric per realitzar el muntatge
- Cablejat i material de mecanitzat.

Cost de muntatge per l'empresa:

En aquest subapartat s'explica els elements comprats per l'empresa, l'elecció dels distribuïdors i el cost total dels equips. En primer lloc es justifica la selecció del distribuïdor dels elements elèctrics i després el cost del material del què està fabricat la tapa de l'armari.

Per comprar tots els aparells elèctrics s'ha realitzat una recerca dels diferents distribuïdors que podien proporcionar els elements necessaris. S'ha procurat que aquests distribuïdors tinguessin la capacitat de proporcionar tots els elements necessaris, amb l'objectiu de facilitar la compra i el sistema d'entrega del producte. Per poder comparar els preus s'ha contactat amb tres distribuïdors que disposaven de tots o gairebé tots els elements necessaris i s'ha demanat un pressupost. Per mantenir la privacitat de les empreses s'ha eliminat dels pressupostos els elements identificatius i s'ha re nomenat les empreses com A, B i C.

Els pressupostos són els següents.

A

Ref. Fabricante	Descripcion	Cantidad	UE	Precio	Dto1	Dto2	Dto3	RAEE	Importe
ZB4BA3	CBZA.PULS.d.22 RASANTE S/PLACA VD.E.MET.	3,00	PZ	7,260	37,00	0,00	0,00	0,00	13,72
ZB4BA4	CBZA.PULS.d.22 RASANTE S/PLACA RJ.E.MET.	2,00	PZ	7,260	37,00	0,00	0,00	0,00	9,15
ZB4BS834	CBZA.PULS.SETA d.30 GIRAR RJ.E.MET.	1,00	PZ	39,180	37,00	0,00	0,00	0,00	24,68
ZB4BZ101	CPO.d.22 1NA CONEX.TORN.E.MET.	3,00	PZ	9,990	37,00	0,00	0,00	0,00	18,88
ZB4BZ102	CPO.d.22 1NC CONEX.TORN.E.MET.	3,00	PZ	9,990	37,00	0,00	0,00	0,00	18,88
B-00202V12EFNPS	INTERRUPTOR ON-OFF TRIPOLAR V12 20A	1,00	PZ	36,520	35,00	0,00	0,00	0,00	23,74
LC1D18P7	CONT.18A 1NA/1NC 230V 50/60HZ	5,00	PZ	78,950	37,00	0,00	0,00	0,00	248,69
LADN22	BLOQUE CONT.AUX.2NA/2NC FRONT.	2,00	PZ	22,570	37,00	0,00	0,00	0,00	28,44
LC1D12P7	CONT.12A 1NA/1NC 230V 50/60HZ	2,00	PZ	57,990	37,00	0,00	0,00	0,00	73,07
LRD1521	RELE TERMICO 12-18A CL.20	1,00	UN	158,310	37,00	0,00	0,00	0,00	99,74
ZMMV01	TEMP. ZMMV01 24-250 VAC / 24 VCC NPN	1,00	UN	45,500	20,00	0,00	0,00	0,00	36,40
ZB4BVM3	CPO.d.22 230-240V TORN.C/LED VD.E.MET.	3,00	PZ	24,010	37,00	0,00	0,00	0,00	45,38
ZB4BV03	CABEZA C/LAMP.BA9s VERDE	3,00	PZ	6,150	37,00	0,00	0,00	0,00	11,62
ZB4BVM4	CPO.d.22 230-240V TORN.C/LED RJ.E.MET.	1,00	PZ	24,010	37,00	0,00	0,00	0,00	15,13
ZB4BV04	CABEZA C/LAMP.BA9s ROJO	1,00	PZ	6,150	37,00	0,00	0,00	0,00	3,87
03105	CLAVIJA 32A-3P+T 6h 380-415V IP44	1,00	PZ	7,170	35,00	0,00	0,00	0,00	4,66
EC72/100/1A	AMPERIMETRO EC 72x72 HMOV.100/1A+ES.	1,00	UN	33,260	20,00	0,00	0,00	0,00	26,61
BNC72/500V	VOLTIMETRO BNC VNOM.72x72 0...450 500V	1,00	UN	98,210	20,00	0,00	0,00	0,00	78,57

Portes: 0,00		TOTAL RAEE: 0,00		%Dto. P.P. 0,00		%Rec. Financiero: 0,00		% IRPF 0,00		Importe IRPF: 0,00	
Base Imponible		%IVA	Importe IVA	%RE	Importe RE	Total		TOTAL PEDIDO			
781,23		21,00	164,06	0,00	0,00	164,06					
0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		945,29 EUR			

Figura 6.1: Pressupost distribuïdor A

B

Referencia	Fabricant	Descripció	Unitats	Preu/Unitat	Import
EQ74-I1522N1CA	Sifam Tinsley	Amperímetre analògic 20 A 68x68	9	12,78	115,02
SS74-V2VX1N1CA	Sifam Tinsley	Voltímetre analògic 500 V 68x68	3	19,55	58,65
ZB4BZ101	Schneider elèctric	Cos Pols. NA	4	7,61	30,44
ZB4BA3	Schneider elèctric	Capçal Pols. Verd	4	5,31	21,24
ZB4BL4	Schneider elèctric	Capçal Pols. Vermell	3	7,32	21,96
ZB4BZ102	Schneider elèctric	Cos Pols. NC	4	7,61	30,44
ZB4BS844	Schneider elèctric	Capçal P. Emergència	1	27,51	27,51
VCD01	Schneider elèctric	Inter. Sec 20A	1	32,85	32,85
LC1D18P7	Schneider elèctric	Cont 18A 230V 50Hz	5	58,16	290,8
LADN40	Schneider elèctric	Bloc Cont 4NA	3	16,63	49,89
LC1D12P7	Schneider elèctric	Cont 12A 230V 50Hz	2	42,72	85,44
LRD21	Schneider elèctric	Relé tèrmic 12-18A	2	63,99	127,98
RE22R1MAMR	Schneider elèctric	Temporitzador retard connexió	1	61,14	61,14
ZB4BVM3	Schneider elèctric	Cos Pil. Verd	4	17,57	70,28
ZB4BV033	Schneider elèctric	Capçal Pil. Verd	4	5,12	20,48
ZB4BVM5	Schneider elèctric	Cos Pil. Groc	1	17,57	17,57
ZB4BV053	Schneider elèctric	Capçal Pil. Groc	1	5,12	5,12
555239	Legrand	Connector 3P+N+E	1	14,80	14,80

Total pressupost: **1081,61 €**

*Impostos no inclosos

Figura 6.2: Pressupost distribuïdor B

C

	REFERENCIA	DESCRIPCION	UNIDADES	PRECIO/U.P.	DTO.	IMPORTE
1	QIR M10225.	EC72 20A,AMPERIMETRO P/MEDIDA CA,HIERRO MOVIL,PANEL 72X72	9,00	27.60	1 PCE NETO	248.40
2	QIR M10628.	EC72 FII 500V,VOLT.Q/CONM.FASE P/MED.ALT.,HIERRO MV./P.72X72	3,00	29.67	1 PCE NETO	89.01
3	CON ZB4BZ101	CUERPO CONTACTO NA	4,00	3.95	1 PCE NETO	15.80
4	TEL ZB4BA3	CABEZA PULS.RASANTE VERDE	4,00	3.23	1 PCE NETO	12.92
5	TEL ZB4BZ102	CUERPO COMPLETO NC	3,00	4.44	1 PCE NETO	13.32
6	TEL ZB4BL4	CABEZA PULS.SALIENTE ROJO	3,00	3.23	1 PCE NETO	9.69
7	TEL ZB4BZ102	CUERPO COMPLETO NC	1,00	4.44	1 PCE NETO	4.44
8	TEL ZB4BS844	CABEZA SETA 40MM. EMERG. PULSAR - GIRAR	1,00	16.72	1 PCE NETO	16.72
9	TEL VCD01	INTERR.-SECC. VARIO 20A TRIP.	1,00	20.75	1 PCE NETO	20.75
10	TEL LC1D18F7	CONT 18A 1NA/1NC 230V 50/60HZ	5,00	37.28	1 PCE NETO	186.40
11	TEL LADN40	BLOQUE CONT AUX 4NA FRONT	3,00	10.66	1 PCE NETO	31.98
12	TEL LC1D12F7	CONT 12A 1NA/1NC 230V 50/60HZ	2,00	27.38	1 PCE NETO	54.76
13	TEL LRD21	RELE TERMICO 12-18A	2,00	38.64	1 PCE NETO	77.28
14	TEL RE22R1MAMR	TEMPO. RETARDO A LA CONEXION	1,00	37.03	1 PCE NETO	37.03
15	TEL ZB4BVM3	CUERPO PIL. LUM. LED 230V VERDE	4,00	10.68	1 PCE NETO	42.72
16	TEL ZB4BV033	CABEZA PIL.LUM. LED VERDE	4,00	3.11	1 PCE NETO	12.44
17	TEL ZB4BVM5	CUERPO PIL. LUM. LED 230V AMARILLO	1,00	10.68	1 PCE NETO	10.68
18	TEL ZB4BV053	CABEZA PIL.LUM. LED AMARILLO	1,00	3.11	1 PCE NETO	3.11
19	LEG 555239	P17 CLAV 32A 3P+N+T 415V IP44	1,00	6.18	1 PCE NETO	6.18
20	MKG A9F79420	IC80N 4P 20A C	1,00	40.84	1 PCE NETO	40.84
Observaciones:						
						TOTAL PRESUPUESTO <small>*Impuestos no incluidos</small> 934.47 Eur

Figura 6.3: Pressupost distribuïdor C

Elecció del distribuïdor adient.

S'ha de tindre en compte que els distribuïdors A i B no disposaven de tots els elements necessaris de manera que el preu total és orientatiu, ja que no és la suma dels mateixos elements, de manera que primer s'explicaran les diferències dels diferents pressupostos i posteriorment es comprarà l'apartat econòmic.

A causa que el distribuïdor A no disposa de tots els components necessaris, ha substituït aquests components per alguns amb característiques semblants. A la llista següent es representen els elements no disponibles.

- Bloc de contactes auxiliars de contactors: aquest component diferia de la petició inicial en el fet que aquest bloc de contactes auxiliars està format per dos contactes normalment oberts i dos contactes normalment tancats, i el bloc de contactes sol·licitat està format per quatre contactes normalment oberts
- Connector 32 A 3P+T: Aquest connector no es pot utilitzar en el muntatge, ja que no disposa de connexió al terminal neutre de la xarxa.
- Magnetotèrmic 20 A 4 pols: Aquest distribuïdor no disposava d'aquest producte, per això no està inclòs al pressupost.

En el cas del distribuïdor B, només no s'ha aconseguit la disponibilitat d'un dels components, l'interruptor magnetotèrmic automàtic de 20 A.

Considerant la disponibilitat de tots els elements i el cost global dels components s'ha decidit realitzar la compra al distribuïdor C, ja que el preu total és el més econòmic malgrat que és l'únic pressupost que compleix amb tots els components demanats.

A part dels components elèctrics també s'ha comprat la xapa amb la qual es realitza la tapa de l'armari. Per seleccionar de quin material realitzava el muntatge de la tapa on es col·loquen els equips de mesura i els dispositius de control del muntatge s'ha demanat un pressupost a un distribuïdor especialitzat en aquest estil de productes. Per poder realitzar una comparació s'ha demanat el pressupost de dues xapes de materials diferents, una de Celotex i l'altre de Baquelita. Les dimensions de la xapa escollides són de 2000x1000 mm. Segons el pressupost enviat pel distribuïdor el preu de la xapa de baquelita és de 135 € i el preu de la xapa de Celotex és de 180 €. Després d'una recerca de les característiques dels materials, s'ha decidit realitzar la compra de la xapa de Celotex, ja que la diferència de

preu entre aquestes dues plaques no és molt elevada i les característiques del Celotex s'han considerat més adequades.

Sumant els costos explicats en aquest capítol s'obté que el cost que ha suposat el material per l'empresa és de 1125,29 €.

6.2 Cost de fabricació de l'equip per comercialitzar

Tenint en compte que el sistema dissenyat en aquest projecte es pot arribar a comercialitzar com a sistema d'assaig de variadors de freqüència, s'ha estudiat el cost que tindria la fabricació del sistema tenint els costos de material mencionats al capítol anterior i el cost de la mà d'obra. S'ha de tindre en compte que el preu de la bancada de motors, del armari i de l'*inverter* Omron són preus estimats.

Realitzant una estimació del preu que proporcionen els diferents distribuïdors per l'*inverter* Omron 3G3RX-A4370-E1F, és de 3500 €.

El preu de la bancada de motors resulta més complicat d'estimar, ja que l'acoblament mecànic s'ha d'encomanar a una empresa externa especialista en aquests àmbit. Considerant que el preu aproximat de cada motor és de 650 € i que el preu de la realització del acoblament mecànic és de 470 €, el preu total de la bancada de motors augmenta fins a 1770 €.

A causa de que l'armari utilitzat és va comprar fa molts anys i ja no està disponible el mateix armari al mercat s'ha considerat el preu d'un armari de característiques semblants. El preu d'aquest armari és aproximadament de 675 €.

En el disseny d'aquest muntatge els enginyers de l'empresa han dedicat 3 mesos, que equivalen a unes 480 hores. Atès que el preu d'enginyeria de l'empresa és aproximadament de 70 €/hora, el cost d'enginyeria d'aquest projecte és de 33600 €.

En el muntatge del sistema els tècnics han invertit 40 hores, considerant que el preu de la mà d'obra d'aquesta empresa és aproximadament de 30 €/hora, el cost del muntatge és de 1200 €.

Considerant el cost del material mencionat en l'apartat anterior i els costos explicats en aquest apartat el cost de la producció d'un muntatge seria de **41870,29 €**.

7. Conclusions

Amb la realització d'aquest projecte s'ha aconseguit complir els objectius que s'havien establert al inici del treball, ja que s'ha dissenyat i construït un sistema d'assaig per a variadors de freqüència que redueix significativament el consum energètic. En aquest apartat s'exposen les conclusions extretes d'aquest projecte i els treballs futurs que es poden realitzar.

7.1 Conclusions del treball

Amb l'estudi de les possibles solucions per millorar l'eficiència energètica d'aquest tipus d'assajos s'ha arribat a la conclusió que existeixen varies solucions que compleixen les característiques desitjades de manera que aquest àmbit d'estudi proporciona un gran ventall de temes a tractar i estudiar en profunditat que han quedat fora de l'abast del present projecte.

En quant a la solució adoptada en aquest projecte s'extreu la conclusió de que alternativa és la més adequada tenint en compte les limitacions que genera la construcció del muntatge i les especificacions necessàries per l'empresa. Observant les proves realitzades amb anterioritat a la construcció del muntatge s'observa que els resultats obtinguts corresponen als objectius plantejats amb anterioritat, ja que el sistema de prova redueix el consum energètic fins a valor superiors al 40%. Com es pot observar a la taula 1 amb la construcció d'aquest muntatge també s'ha aconseguit l'objectiu de testejar els variadors de freqüència a potències més elevades de les que es podien testejar amb anterioritat. En la prova inicial no s'ha portat el muntatge al seu punt de treball màxim atès que es sistema de prova no proporcionava les mesures de seguretat suficients per realitzar aquest estil de proves.

Respecte al disseny i la construcció del muntatge s'ha realitzat un estudi del components adequats que proporcionen les mesures de seguretat necessàries i que faciliten la utilització del sistema. Per aconseguir-ho s'ha estudiat les alternatives de posicionat dels components que permeten que l'usuari disposi de tots els elements necessaris en un espai reduït, facilitant d'aquesta manera el control i operació del sistema. En aquest aspecte també s'ha realitzat un estudi de diferents materials aïllants que es poden utilitzar en aquest tipus d'aplicacions i s'ha conclòs en la utilització d'un material que proporciona les característiques mecàniques i elèctriques necessàries.

7.2 Futurs treballs

Durant el període de realització d'aquest projecte s'ha arribat a la conclusió que el camp d'estudi relacionat amb els variadors de freqüència i els motors d'inducció és molt extens i que permet moltes alternatives i millores. Per aquest fet cal puntualitzar que l'objectiu principal de la realització d'aquest projecte era dissenyar i construir un prototip que permeti reduir el consum energètic a l'empresa teknoUstex, i que aquest disseny pugui servir per realitzar futurs treballs que millorin les prestacions d'aquest projecte. En aquest apartat s'expliquen les possibles millores que s'han observat durant la realització del projecte.

En aquest projecte s'ha utilitzat una bancada de motors que es disposava a l'empresa prèviament a la realització del projecte, tenint en compte que els motors utilitzats en aquesta bancada tenen una potència màxima de 7,5 kW si es volgués realitzar un muntatge que permetés assajar *inverters* a potències més elevades seria necessària la utilització d'una bancada de motors de potència més elevada. El disseny de les proteccions d'aquest muntatge s'ha realitzat tenint en compte les limitacions dels motors utilitzats i per tant si es canviessin els motors també s'hauria de canviar els components que formen les proteccions.

Un altre aspecte que es pot millorar en treballs futurs és el control de les velocitats de gir dels motors. En aquest muntatge el control d'aquestes velocitats es realitza manualment i individualment en cada motor, aquest fet pot comportar un desajust de les velocitats que generi un consum energètic inesperat. Atès que el sistema està dissenyat per assajar variadors de models i marques diferents no es pot dissenyar un sistema automatitzat que controli la velocitat del motor connectat a aquest equip. Tot i això es considera que una possible solució és modificar automàticament la velocitat de gir del motor alimentat per l'*inverter* incorporat al sistema, en funció de la velocitat que s'assigna al motor alimentat per l'*inverter* de prova. Amb aquesta solució es redueix la complexitat d'utilització del sistema, ja que només s'hauria de controlar la velocitat de gir d'un dels motors. L'objectiu principal és assignar la potència a la que es vol assajar l'*inverter* de prova i que el sistema sigui capaç de controlar la velocitat dels motors per aconseguir-ho.

Per últim un dels aspectes que s'ha de millorar és el sistema de mesura de la tensió d'alimentació dels motors. Com s'ha explicat en aquest projecte, per mesurar aquesta tensió correctament és necessari la utilització d'un filtre. En aquest muntatge s'ha utilitzat un filtre passiu però aquest filtre genera una atenuació de la mesura obtinguda i per tant dificulta la mesura exacte del valor eficaç de la tensió. En aquest projecte s'ha considerat que uns

possible solució per aquest sistema de mesura es la utilització d'un filtre actiu, que permet filtrar de forma més eficient la mesura presa, i per tant permet obtindre mesures més exactes.

Un pas més enllà seria convertir el sistema en un dinamòmetre per assajar *inverters* i motors amb diferents perfils de càrrega i cicles de treball, Per aconseguir aquesta finalitat caldria incorporar a la bancada dels motor un encoder per mesurar la velocitat en temps real i amb precisió. El *inverter* incorporat al sistema hauria de ser amb control vectorial i s'hauria de instrumentar i automatitzar tot el sistema per poder fer assajos normatius i adquirir las dades amb un sistema digital.

Bibliografia

- [1] Brimal K. Bose, 2002. Moder Power Electronics and AC Drives. ISBN: 0130167436
- [2] S. Galceran , M. Teixidó , A. Sumper , J. Casas , J. Sánchez. 2003. Adjustable Speed Drives and Power Quality. RE%PQJ-papers. Abril 2003. Vol. 1 nu.1
<http://www.icrepq.com/pdfs/SUDRIA364.pdf>
- [3] Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins. 1995. Second Edition. Power Electronics, Converters, Applications and Desing. ISBN: 0471584088
- [4] Jesus Fraile Mora. 2003. Quinta edición. Máquinas Eléctricas. ISBN: 8448139135
- [5] A. E. Fitzgerald, Charles Kingley Jr., Stephen D. Umans. 2003. Sixth Edition. Electric Machinery. ISBN: 0073660094
- [6] P. Sandholdt, E. Ritchie, J.K. Pedersen, R.E. Betz. A Dynamometer Performing Dynamical Emulation of Loads with Non-Linear Friction.
- [7] J.J. Rodriguez-Rivas, E. Peralta-Sánchez. Design, 2014. Commissioning and Testing of an Electrodynamometer Based on PM Synchronous Machines. Journal of Applied Research and Technology. June 2014. Vol.12 p. 359-369
- [8] Miguel Angel Rodriguez, Frenado de máquinas asincronas o de inducción
- [9] Key World Energy Statistics. 2017. International Energy Agency
- [10] International Energy Outlook. 2016, International Energy Agency. May 2016.
- [11] Leyden Boletín Tècnico BT002
http://www.leyden.com.ar/esp/pdf/boletin_02.pdf